

VARIATIONS DE LA PHOSPHATÉMIE EN FONCTION DE L'APPORT PHOSPHATÉ CHEZ LA VACHE LAITIÈRE

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON

et soutenue publiquement le 26 Février 1964

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

PAR

Louis MONAVON

Né le 15 Juillet 1938, à LYON (Rhône)



LYON

Imprimerie BOSC Frères
42, quai Gailleton, 42

1964

**VARIATIONS DE LA PHOSPHATEMIE
EN FONCTION DE L'APPORT PHOSPHATE
CHEZ LA VACHE LAITIERE**

**VARIATIONS
DE LA PHOSPHATÉMIE
EN FONCTION
DE L'APPORT PHOSPHATÉ
CHEZ LA VACHE LAITIÈRE**

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE DE LYON

et soutenue publiquement le 26 Février 1964

POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

PAR

Louis MONAVON

Né le 15 Juillet 1938, à LYON (Rhône)



LYON

Imprimerie BOSC Frères
42, quai Gaillon, 42

1964

PERSONNEL ENSEIGNANT DE L'ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE LYON

Directeur	M. FLORIO
Directeur honoraire	M. JUNG
Directeur honoraire	M. TAPERNOUX
Professeur honoraire	M. CUNY

PROFESSEURS

14 chaires

Pharmacie et Toxicologie	MM. TAPERNOUX
Anatomie descriptive, Extérieur, Anatomie appliquée	BARONE
Physiologie, Thérapeutique, Pharmacodynamie	BOST
Histologie, Embryologie, Anatomie pathologique	LUCAM
Hygiène et industrie des aliments d'origine animale	FLACHAT
Zoologie appliquée, Parasitologie externe, Parasitologie interne ..	EUZEBY
Pathologie médicale des équidés et des carnivores. Législation vétérinaire	FLORIO
Pathologie médicale du bétail et des animaux de basse-cour	COTTEREAU
Technique chirurgicale, Pathologie chirurgicale	COLLET
Obstétrique, Pathologie de la Reproduction	BERTRAND
Microbiologie, Immunologie, Maladies contagieuses, Police sani- taire	JOUBERT
Ethnologie, Hygiène, Zootechnie, Economie rurale	FROGET
Botanique appliquée, Agronomie, Alimentation	JEAN-BLAIN
Physique et Chimie biologiques et médicales	MAGAT

CHEFS DE TRAVAUX

MM. FERNEY, RUCKEBUSCH, Agrégés.
MM. BUSSIERAS, LAPRAS, LE NIHOUE, OUDAR, VAN HAVERBEKE,
JEAN-BLAIN Claude

ASSISTANTS

MM. BLAVIGNAC, CHANTEGRELET, PROY, VERINE

EXAMINATEURS DE LA THESE

Président : Monsieur le Professeur COUDERT, de la Faculté de Médecine.
Premier Assesseur : Monsieur le Professeur JEAN-BLAIN, de l'Ecole Vétérinaire.
Deuxième Assesseur : Monsieur le Professeur BARONE, de l'Ecole Vétérinaire.

La Faculté de Médecine et l'Ecole Vétérinaire déclarent que les opinions émises dans les dissertations qui leur sont présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elles n'entendent leur donner ni approbation, ni improbation.

A MES PARENTS

Rien ne serait arrivé sans eux.



A MA FAMILLE

A MES AMIS

A MONSIEUR LE PROFESSEUR JEAN COUDERT
de la Faculté Mixte de Médecine et de Pharmacie de Lyon

Avec respect, en témoignage d'hom-
mage dévoué.

A MONSIEUR LE PROFESSEUR MARCEL JEAN-BLAIN
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon

Ce travail de son disciple profondément respectueux.

A MONSIEUR LE PROFESSEUR ROBERT BARONE
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon

En témoignage de reconnaissance.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

INTRODUCTION

L'importance du phosphore et du calcium dans la vie animale, pourtant bien connue, est trop souvent négligée en pratique de l'élevage. La fréquence des manifestations pathologiques des carences phosphocalciques en est la preuve.

Le phosphore pose deux problèmes :

Avec le *problème pratique*, il s'agit de fournir aux animaux l'apport alimentaire nécessaire et suffisant.

Le *problème scientifique*, plus mystérieux, intéresse trois disciplines : alimentation, physiologie, pathologie.

Dans la première partie de notre travail, nous avons cru bon de rassembler les connaissances acquises sur le phosphore et le calcium chez les animaux de l'espèce bovine et nous étudions successivement le problème alimentaire, le problème physiologique et le problème pathologique que posent ces minéraux.

Dans la deuxième partie, nous passons en revue les méthodes d'appréciation des minéraux phosphatés. Nous étudions surtout la détermination de la calcémie et de la phosphatémie et faisons une analyse critique de leur valeur comme tests d'assimilation des minéraux et comme épreuves de diagnostic des maladies d'origine phosphocalcique.

Enfin, nous relatons notre expérimentation dont le but est de montrer que la phosphatémie variant dans le même sens que l'apport phosphocalcique alimentaire, il est possible de mettre en évidence la valeur d'un complément minéral par des dosages de phosphatémie suffisamment nombreux pour éliminer l'influence des autres facteurs de variation.

PREMIERE PARTIE

CONNAISSANCES ACTUELLES

CHAPITRE PREMIER

PHOSPHORE ET CALCIUM DANS LA NATURE :

LE PROBLEME ALIMENTAIRE

L'urgence du problème alimentaire est bien mise en évidence par la constatation qu'une vache produisant quatre mille litres de lait en un an, excrète ainsi 3 kilos de phosphore et 6 kilos de calcium. On comprend la nécessité d'un apport suffisant et de bonne qualité. Nous envisagerons ce problème sous deux aspects : la quantité et la qualité.

1. — Quantités de phosphore et de calcium dans la nature

1. — Dans le monde minéral.

L'origine de tout phosphore et de tout calcium, chez les végétaux comme chez les animaux, se trouve dans le monde minéral. De nombreuses roches en contiennent, mais en pourcentages très variables ; elles nous intéressent à deux titres :

— elles conditionnent la teneur de la terre végétale qu'elles supportent et, par suite, celle des plantes qu'on y récolte et la composition chimique des eaux ;

— certaines sont utilisées pour la préparation de compléments minéraux utilisés dans l'alimentation.

Dans la terre végétale, le taux moyen de calcium est de 1,2 % mais il varie de 0 à 25 % ; la teneur en phosphore passe de 0,05 % dans les terres granitiques, à 0,1 % dans les terres calcaires et 0,2 % dans les terres volcaniques.

Cantiget, par des analyses de sol et de fourrage, a pu établir un rapport entre la teneur phosphocalcique du sol et la fréquence des carences chez les animaux.

Certaines roches sont utilisées pour la préparation industrielle de compléments minéraux riches en calcium ou en phosphore, ou en ces deux éléments.

Ce sont la craie, le phosphate tricalcique naturel, et des phosphates complexes d'aluminium et de calcium, ou d'aluminium et de fer.

Enfin, le monde minéral offre encore une source de phosphore et calcium surtout ; d'après Brouarde et Mosny, l'eau de boisson contient :

- de 0,0 à 0,5 mg de phosphore par litre,
- de 1 à 600 mg de calcium par litre. (Dans la plupart des eaux potables, le taux est de 80 à 100 mg/l.)

Comme une vache boit en moyenne 60 litres d'eau par jour, elle absorbe ainsi environ 30 mg de phosphore, ce qui est négligeable, et 5 grammes de calcium.

2. — Dans le monde végétal.

En agronomie, le phosphore et le calcium jouent un rôle très important. Pour nous, il suffit de savoir que les végétaux employés comme aliments des bovins sont plus ou moins riches en minéraux. D'une façon générale, la teneur en phosphore et calcium des plantes varie suivant l'espèce botanique et suivant la nature du sol, son pH et son humidité ; elle change aussi avec la partie de la plante considérée. Mais schématiquement, on peut dire que parmi les végétaux utilisés pour les bovins :

- les fourrages, surtout de légumineuses, sont riches en calcium (0,2 à 2 % et pauvres en phosphore (0,11 à 0,23 %) ;
- les grains sont riches en phosphore (0,2 à 0,5 %) et pauvres en calcium (0,01 à 0,10 %) ;
- les tourteaux sont très riches en phosphore (0,5 à 0,9 %) et assez pauvres en calcium (0,1 à 0,4 %) ;
- les tubercules et les racines sont à la fois pauvres en calcium (0,025 %) et en phosphore (0,025 %).

Cantiget en France, et Theiler en Afrique du Sud, ont montré que, dans les régions dont le sol est riche en phosphore et calcium, les plantes en sont elles-mêmes bien pourvues et les animaux ne connaissent pas de carence phosphocalcique. L'intérêt de la présence de ces minéraux dans les plantes est indiscutable : dans les conditions naturelles, les besoins des bovins sont couverts par les éléments végétaux.

3. — Dans le monde animal.

Chez les bovins, le calcium et le phosphore représentent 1,40 % et 0,60 % du poids du corps. Ils se trouvent surtout dans les os, puisque ceux-ci contiennent 90 % du calcium et 70% du phosphore.

On les trouve sous les formes suivantes :

Dans les os,

Phosphate tricalcique : 87 % des matières minérales de l'os.

Carbonate de calcium : 10 %.

Fluorure de calcium : 0,4 %.

Dans les tissus mous,

Le phosphore protidique se trouve dans trois composés importants : les nucléoprotides qui forment la substance fondamentale des noyaux cellulaires ; les nucléotides qu'on trouve dans différents organes et en particulier, dans le tissu musculaire d'où Liébig a extrait l'acide inosique ; les paranucléines qui forment les caséines des divers laits et les vitellines du jaune d'œuf.

Le phosphore lipidique est encore connu sous le nom de phospholipides ; on le rencontre dans les centres nerveux et le sang sous forme de lécithines, céphaline, myéline, etc...

Le phosphore glucidique, enfin, a été mis en évidence par Emnden et ses collaborateurs dans le suc musculaire où il forme le lactacidogène et joue un rôle essentiel dans la physiologie du muscle.

Dans le sang,

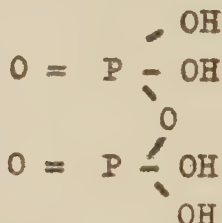
La calcémie est le taux de calcium, du plasma ou du

sérum sanguins. Sa valeur varie de 90 à 120 mg/l suivant les auteurs et la moyenne se situe à 110 mg/l.

Le phosphore existe dans le sang sous des formes organiques et minérales réparties entre les hématies, les leucocytes et le plasma. La phosphorémie est le taux de phosphore total du sang, minéral et organique, contenu dans les hématies, les globules blancs et le plasma.

Le phosphore minéral dans le sang existe sous les formes de pyrophosphates présents dans la partie globulaire et d'orthophosphates présents dans le plasma.

Les pyrophosphates sont les sels de l'acide pyrophosphorique, de formule simple $P^2 O^7 H^4$ et de formule développée :



Les métaux neutralisant les valences acides sont variables ; on peut trouver :

Pyrophosphate de calcium $P^2 O^7 Ca^2, 4 H^2O$

Masse moléculaire : $M = 326$

Pyrophosphate de potassium $P^2 O^7 K^4, 3 H^2O$

$M = 384$

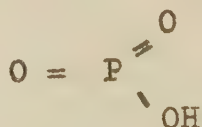
Pyrophosphate de magnésium $P^2 O^7 Mg^2$

$M = 223$

Pyrophosphate de sodium $P^2 O^7 Na^4, 10 H^2O$

$M = 446$

Les métaphosphates sont les sels de l'acide métaphosphorique, de formule simple $PO^3 H$ et de formule développée :



— Métaphosphate de calcium	$(\text{PO}^3)_2 \text{Ca}$	M = 198
— Métaphosphate de potassium	$\text{PO}^3 \text{K}$	M = 118
— Métaphosphate de sodium	$\text{PO}^3 \text{Na}$	M = 102

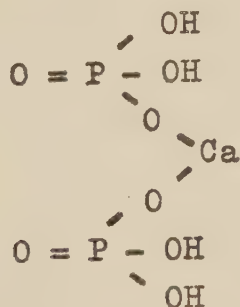
Les orthophosphates sont les sels de l'acide orthophosphorique, dont les formules sont :



Dans les sels, les métaux peuvent neutraliser une, deux ou trois valences acides. Chaque métal donne donc naissance à trois sels : un sel neutre, un sel monoacide et un sel diacide.

ORTHOPHOSPHATES DE CALCIUM

— Monophosphate de calcium	$(\text{PO}^4)_2 \text{Ca}$	$\text{H}^4, \text{H}^2\text{O}$	M = 252
----------------------------	-----------------------------	----------------------------------	---------



— Biphosphate de calcium	$\text{PO}^4 \text{Ca}$	$\text{H}, 2 \text{H}^2\text{O}$	M = 172
— Triphosphate de calcium	$(\text{PO}^4)_2 \text{Ca}^3$		M = 310

ORTHOPHOSPHATES DE POTASSIUM

— Phosphate monobasique de potassium	$\text{PO}^4 \text{K}$	H^2	M = 136
— Phosphate bibasique de potassium	$\text{PO}^4 \text{K}^2$	H	M = 174
— Phosphate tribasique de potassium	$\text{PO}^4 \text{K}^3$		M = 212

ORTHOPHOSPHATES DE SODIUM

— Monophosphate de sodium	$\text{PO}^4 \text{Na}$	$\text{H}^2, \text{H}^2\text{O}$	M = 138
— Biphosphate de sodium	$\text{PO}^4 \text{Na}^2$	$\text{H}, 12 \text{H}^2\text{O}$	M = 358
— Triphosphate de sodium	$\text{PO}^4 \text{Na}^3$	$12 \text{H}^2\text{O}$	M = 380

ORTHOPHOSPHATE DE MAGNÉSIUM

— Biphosphate de magnésium $\text{PO}^4 \text{Mg H, 7 H}_2\text{O}$ $\text{M} = 246$

Le taux des orthophosphates du plasma constitue la phosphatémie.

On peut le déterminer par la méthode de Briggs :

En présence d'un excès d'acide molybdique, l'acide orthophosphorique forme un complexe, l'acide phosphoduodécimomolybdique, de formule : $\text{PO}^4 \text{H}^3, 12 \text{Mo O}^3$.

Ce complexe est aisément réductible par le mélange d'hydroquinone et de bisulfite de sodium, en sous-oxydes de molybdène. La coloration bleue de ces sous-oxydes, dont l'intensité est proportionnelle au taux des orthophosphates est facilement mesurable au photo-colorimètre.

Pour mémoire, nous rappelons qu'on désigne sous le nom de phosphore acidosoluble du plasma, l'ensemble des dérivés solubles dans une solution d'acide trichloracétique. Le phosphore protéique et lipidique étant insoluble dans ce réactif, le phosphore acidosoluble contient des orthophosphates dosables par la méthode de Briggs, et divers composés : phospho-dérivés du métabolisme glucidique, nucléotides, phosphagène, etc...

Le phosphore de ces divers composés peut être dosé par détermination, après minéralisation, du phosphore total acidosoluble, puis soustraction, de ce phosphore total, du phosphore des orthophosphates obtenu par la méthode de Briggs.

Le phosphore minéral du plasma est surtout représenté par des orthophosphates monométalliques de formule $\text{PO}^4 \text{H}^2 \text{M}$ (15 %) et par des orthophosphates bimétalliques de formule $\text{PO}^4 \text{H M}^2$ (85 %).

Chez la vache, la phosphatémie a été déterminée par de nombreux auteurs :

Cardassis	54 mg/l
Liégeois	48 à 67 mg/l
Beihart	48 à 54 mg/l
Brochart	57 mg/l
Lesbouyries et Charton	30 à 60 mg/l
Derivaux	30 à 60 mg/l
Lamarre	46 à 60 mg/l
Squibb, Guzmán	60 à 92 mg/l

D'une façon générale, les chiffres varient de 30 à 90 mg/l avec une moyenne de 55 mg/l. Les différences obtenues par les auteurs s'expliquent par le fait que tous n'employaient pas la même méthode de dosage et surtout par le fait que la phosphatémie est une grandeur éminemment variable : elle est sous la dépendance de nombreux facteurs accessoires tels que l'espèce, l'âge, le moment de la mise-bas, la lactation, les saisons, le travail musculaire, et d'un facteur principal tout puissant, l'alimentation.

Une alimentation déficiente en phosphore se traduit par de l'hypophosphatémie. Dans l'ostéomalacie bovine qui est une aphasphorose, l'hypophosphatémie est la règle : tous les auteurs s'accordent sur un taux de 13 à 28 milligrammes de phosphore par litre de sérum, avec une moyenne de 17 milligrammes.

Un apport notable de phosphore fait monter la phosphatémie.

En résumé :

L'origine du phosphore et du calcium utilisés en alimentation bovine se trouve dans quatre éléments naturels : les roches utilisées sous forme de compléments minéraux, l'eau, les végétaux, et les produits d'origine animale tels que les poudres d'os.

Mais les minéraux rencontrés dans la nature ont, pour les nutritionnistes, un intérêt très variable : à la notion de quantité, doit s'ajouter la notion de qualité des minéraux utilisés en alimentation.

II. — Qualités du phosphore et du calcium

L'utilisation d'un minéral par un organisme animal dépend de la nature propre du produit (assimilabilité) et de nombreux facteurs dont les plus reconnus sont le rapport phosphocalcique et la vitamine D.

1. — Assimilabilité.

Les premiers auteurs ont pensé que toutes les formes de phosphore et de calcium étaient assimilables. Puis, rapidement,

les idées ont évolué et l'on a cru que seuls, les sels solubles pouvaient être utilisés. Certains composés insolubles, dont la phytine et ses dérivés, ont même été accusés d'être rachitigènes.

Aujourd'hui, cette question n'a été encore qu'incomplètement éclaircie, malgré de nombreuses expériences de bilan, utilisant même des isotopes radioactifs.

On admet que toutes les formes de phosphore, solubles ou insolubles, y compris la phytine pure, sont assimilables. Le phosphore des phosphates d'alumine, lui-même, est certainement absorbé, à moins qu'il ne soit bloqué par le fer ou le fluor qui contiennent les minerais phosphatés.

Pour déterminer la valeur d'un élément phosphaté, il faudrait établir son coefficient d'utilisation digestive. Pour cela, on doit différencier dans les fèces, la partie du phosphore qui provient de l'alimentation de la partie endogène :

$$\text{CUD} = \frac{\text{Q ingérée} - (\text{q. sécrétée} - \text{q. sécrétée endogène})}{\text{quantité ingérée}} \times 100$$

Le facteur compris entre parenthèses représente les parties de l'aliment qui, non absorbées, sont rejetées directement dans les fèces. On peut les mesurer en donnant, comme source alimentaire, un produit préparé à l'aide d'un isotope radio-actif.

Mais le C.U.D. ainsi déterminé n'est valable que pour un cas très particulier, car il varie énormément avec :

- la ration alimentaire, en particulier protéique,
- la quantité de phosphore et de calcium donnée,
- l'insolation,
- le rapport phosphocalcique,
- de nombreux facteurs plus individuels : état du tube digestif, état endocrinien, état nerveux, etc...

Parmi ces facteurs, il en est sur lesquels l'éleveur peut intervenir ; ce sont ceux qui nous intéressent.

2. — Variations de l'assimilation et de l'utilisation du phosphore et du calcium alimentaires.

A. — BESOINS ET ALIMENTATION.

Quand les besoins augmentent ou que la quantité de P et de Ca alimentaires diminue, le coefficient d'utilisation digestive augmente.

Dans les cas inverses, il diminue. C'est grâce à ce mécanisme que l'organisme se défend quand son alimentation est insuffisante ; mais c'est à cause de lui que, au-delà d'un certain seuil, un supplément alimentaire n'est plus rentable, puis devient franchement inutile et parfois nuisible.

Et c'est pour cette raison que l'alimentation doit être régulière : au moment où la production très élevée rend le bilan obligatoirement déficitaire, l'organisme peut puiser dans les réserves qu'il constitue pendant les périodes où sa production est moindre et son bilan excédentaire.

B. — RAPPORT PHOSPHOCALCIQUE.

La notion d'un rapport idéal entre les quantités de calcium et de phosphore alimentaires, a été établie de façon certaine, chez le rat en croissance, par Pappenheimer, puis par Shol : des rations pauvres en calcium, en phosphore ou en calcium et phosphore provoquent le rachitisme chez de jeunes rats élevés à l'obscurité.

Au contraire, des rats élevés dans les mêmes conditions, mais recevant des quantités suffisantes des deux minéraux, respectant un certain rapport entre elles, ne présentent pas de rachitisme ; chez le rat, ce rapport phosphocalcique idéal a

Ca

été déterminé par Pappenheimer : il est $\frac{\text{Ca}}{\text{P}} = 1$.

Les résultats obtenus chez ces animaux de laboratoire ont été étendus aux différentes espèces animales ; on a souvent oublié que le rapport optimum peut dépendre de l'espèce, qu'il est secondaire à l'exigence des quantités minima de calcium

et de phosphore, et que la présence de vitamine D permet de compenser un léger déséquilibre phosphocalcique.

Chez les bovins surtout, les expériences précises, longues et coûteuses, sont rares ; la plupart des auteurs interprètent quelques expériences que leur valeur a rendues classiques.

Parmi celles-ci, les premières et les plus complètes sont celles que Theiler et Green ont faites dans le Transvaal, en Afrique du Sud, dans les années 1919 à 1930.

Depuis cette époque, beaucoup d'auteurs se sont appuyés sur ces expériences pour déterminer les besoins des bovins et apprécier le rapport phosphocalcique idéal.

Ces déductions nous ayant paru souvent artificielles, parfois illogiques, nous nous sommes attachés à étudier les différents rapports que les auteurs sud-africains ont publié sur le problème du phosphore et du calcium, afin d'en conclure ce qui, logiquement, peut l'être.

a) LES EXPÉRIENCES DE THEILER ET GREEN.

Au début du siècle, Theiler, après avoir montré l'étiologie toxinique du botulisme, prouva que les bovins s'intoxiquent en mangeant des débris de cadavres dans lesquels cultive *Clostridium botulinum*. Il établit un rapport entre l'ostéophagie et la carence phosphocalcique au cours des expériences classiques effectuées à la ferme d'Armoedsvlakte, dans le district de Vryburg (Transvaal), puis à l'Onderstepoort à Prétoria.

Expériences d'Armoedsvlakte.

Les auteurs testent le degré d'ostéomalacie en considérant comme très atteints (« marked cravers ») les animaux qui mangent les vieux os « blanchis » et peu atteints (« mild cravers »), ceux qui ne mangent que les os frais, entourés de viande. Enfin, ils considèrent comme sains les bovins qui ne manifestent aucun « pica ».

Ce test est pratiqué une fois par semaine, chez tous les animaux de la ferme. Les bœufs et les veaux utilisés pour les essais sont entretenus tantôt en liberté dans la nature, tantôt en parcs, tantôt en stabulation permanente.

La ration de base n'a pas été déterminée dans cette première série d'expériences : son but était simplement de montrer

que l'addition de farine d'os ou de son en quantités suffisantes, amène la disparition de l'ostéophagie dans les conditions de vie, où d'ordinaire, on observait du botulisme.

Pour compléter ce résultat, Theiler essaie de donner aux bovins différents minéraux autres que le phosphore : le calcium, le fer, le magnésium, le sodium laissent persister le « pica ».

Enfin, l'épandage de superphosphates dans les prés amène la disparition de l'ostéophagie chez les animaux qui y sont entretenus dans les conditions naturelles, sans supplémentation minérale.

Expériences d'Onderstepoort.

Pour préciser la ration phosphocalcique utile et l'importance de l'aphosphorose dans l'étiologie de l'ostéomalacie, Theiler et ses collaborateurs ont réalisé des essais d'alimentation contrôlée avec plus de précision que lors des premières expériences de 1919-1920, non plus dans la ferme Armoedsvlakte, mais dans les écuries d'Onderstepoort à Prétoria (Transvaal).

Les animaux d'expérience étaient de jeunes génisses âgées de 9 à 24 mois, parquées pendant le jour dans des enceintes ensoleillées et attachées la nuit dans une étable. C'est pendant la nuit, à l'étable, que les animaux consommaient la ration de base carencée en phosphore et calcium et éventuellement, les compléments minéraux.

Ration de base :

Foin	1.360 g.
Endosperme de maïs	2.270 g.
Sang sec	67 g.
Chlorure de sodium	25 g.

Ce mélange représente un apport quotidien de 5 grammes de calcium et 2,2 grammes de phosphore.

Sept lots de deux génisses chacun sont constitués et nourris avec la ration de base additionnée de :

1) 100 grammes de farine d'os.

L'apport minéral était ainsi :

Calcium	27 grammes	Ca	1
			— = —
Phosphore	12,8 grammes	P	0,47

Cliniquement, les deux génisses sont normales ; leur croissance est rapide.

2) 910 grammes de son.

Calcium	6 grammes	Ca	1
			=
Phosphore	10,5 grammes	P	1,8

Cliniquement, les deux génisses sont normales, mais leur croissance est un peu plus lente que dans le lot n° 1.

D'autre part, l'examen nécropsique de l'une d'elles montre une texture particulière du tissu osseux que Theiler qualifie d'ostéoporose. Pour lui, cette déminéralisation est due en bonne partie à une infection de la moelle osseuse, secondaire à une métrite qui a entraîné la mort.

3) 40 grammes de craie.

Calcium	20,7 grammes	Ca	1
			=
Phosphore	2,2 grammes	P	0,108

Les deux génisses sont atteintes d'ostéomalacie clinique. Cela est vérifié par l'examen histologique des os de l'une d'elles, morte de métrite.

4) Néant.

Calcium	5 grammes	Ca	1
			=
Phosphore	2,2 grammes	P	0,44

Ostéomalacie clinique et nécropsique.

5) 25 grammes de farine d'os.

Calcium	10,7 grammes	Ca	1
			=
Phosphore	4,8 grammes	P	0,45

Croissance ralentie et ostéomalacie.

6) 50 grammes de farine d'os.

Calcium	16 grammes	Ca	1
			=
Phosphore	7,5 grammes	P	0,47

Croissance à peu près normale, mais ostéomalacie toujours constatée.

7) Le dernier lot reçoit la même alimentation de base, mais dans laquelle le foin est remplacé par le même poids d'orge verte. De plus, 100 grammes de farine d'os sont ajoutés à la ration. Les résultats sont semblables à ceux du n° 1.

N.B. — Theiler exprime ses résultats en grammes de Ca O et de P² O⁵. Nous les avons convertis en grammes d'éléments Ca et P, selon l'habitude actuelle.

Conclusions de Theiler.

1° L'ostéomalacie est la conséquence de l'aphosphorose. Elle est, en effet, prévenue par l'apport d'une quantité minima de phosphore, soit seul (lot n° 2), soit associé au calcium (lot n° 1).

2° La carence en calcium ne joue aucun rôle dans l'étiologie de l'ostéomalacie. Tout au plus, peut-elle provoquer de l'ostéoporose, c'est-à-dire un simple manque de minéralisation de l'os.

Theiler écrit : « Les éléments minéraux autres que le phosphore sont apparemment présents en quantité suffisante dans la végétation naturelle : l'administration de sels contenant du calcium, du magnésium, du sodium, du potassium, du fer, du chlore et du soufre, ne diminue pas l'ostéophagie, alors que l'acide phosphorique pur la réduit rapidement ».

3° La quantité minima de phosphore à apporter est de 12,8 grammes par jour pour les génisses considérées.

4° Le rapport phosphocalcique à respecter est
$$\frac{\text{Ca}}{\text{P}} = \frac{1}{0,47}$$

Critiques des expériences.

1° Dans la ration de base, devrait intervenir le calcium apporté par l'eau de boisson. Nous avons vu qu'il peut être assez important. Or, le Transvaal est, du point de vue géologique, un vaste plateau triasique traversé par de longues rangées de collines constituées de calcaires et de calcaires dolomitiques, et dominé par quelques pics granitiques. Il est borné au nord-ouest

par le désert calcaire du Kalahari et au sud-est par des formations primaires.

A défaut d'analyse des eaux, nous avons pu noter plusieurs fois, dans les écrits de Theiler ou de ses collaborateurs, l'affirmation de la richesse du sol en calcaire.

Signalons cette phrase : « La matière sèche, la chaux et la magnésie, se trouvent en taux élevés par suite d'un enrichissement du sol par la poussière de dolomite ».

Nous estimons que l'eau de boisson pouvait fort bien apporter une quantité de calcium suffisante pour que les manifestations de la carence ne se révèlent pas. Cela expliquerait très bien les bons résultats obtenus avec la ration 2, malgré son rapport phosphocalcique déséquilibré. On comprendrait ainsi l'inefficacité de la craie qui augmente le déséquilibre de la ration.

2° On ne peut pas se baser sur cette expérience pour déterminer le rapport phosphocalcique convenant aux bovins en général, et aux vaches laitières en particulier.

Theiler écrit : « L'action de l'ardent soleil du Transvaal éliminait le facteur vitamine D ».

Il est bien connu que le rôle de la vitamine D est de contrebalancer un éventuel déséquilibre du rapport phosphocalcique lorsque les quantités de phosphore et de calcium sont suffisantes. Dans l'expérience de Theiler, un déséquilibre ne pouvait donc pas être sensible.

Theiler n'a pas cherché à savoir si, avec un autre rapport phosphocalcique, on obtiendrait des résultats supérieurs.

Les expériences employaient des génisses. Les besoins de la vache laitière, modifiés par la lactation et peut-être par les phénomènes hormonaux qui l'accompagnent, ne sont pas obligatoirement les mêmes.

En conclusion, on peut dire que les expériences de Theiler prouvent l'étiologie carentielle de l'ostéomalacie : celle-ci peut être due à une carence en phosphore. Mais il n'est pas prouvé que cette carence soit la seule en cause, ou la seule capable de provoquer l'ostéomalacie.

Il s'agit d'une étiologie réelle, mais non limitative.

Des essais de Becker et de ses collaborateurs ont d'ailleurs montré que la carence en calcium est loin d'être négligeable, contrairement à ce qu'affirment certains auteurs.

b) LES EXPÉRIENCES DE BECKER, NEAL et SHEALY.

Ces auteurs composaient une ration carencée en calcium (40 % des besoins) et excédentaire en phosphore (400 % des besoins).

Les vaches laitières ainsi nourries ont présenté des fractures du bassin et des côtes, mais des lactations normales. La résistance à la fracture des humérus, mesurée après l'abattage, était de 335 livres seulement alors qu'elle est de 5.000 livres pour un humérus bien minéralisé.

Des quantités suffisantes de calcium et de phosphore sont indispensables aux animaux de l'espèce bovine, particulièrement chez les vaches douées d'une grande aptitude laitière, en raison du drainage journalier opéré par la sécrétion lactée.

C. — VITAMINE D.

Synthétisée par l'organisme sous l'action du rayonnement solaire, cette vitamine joue le rôle d'un tampon entre le phosphore et le calcium : elle supprime ou diminue l'effet nocif d'un léger déséquilibre phosphocalcique pourvu que les quantités de phosphore et de calcium soient suffisantes.

La plupart des auteurs admettent qu'elle agit au niveau de l'intestin pour augmenter l'absorption des minéraux et diminuer l'excrétion apparente (Greenberg) et au niveau des os, pour faciliter la minéralisation du support protidique.

L'éleveur devra donc se concilier ce facteur en soumettant, aussi longtemps que possible, les animaux à l'action du soleil, même en hiver, ou en apportant de la vitamine D dans l'alimentation.

III. — Conclusion

En alimentation bovine, le problème de l'apport phosphocalcique est d'une importance primordiale à cause des lactations énormes que produisent les actuelles vaches laitières.

Il doit être résolu par l'emploi d'une alimentation de base de bonne qualité, complémentée *régulièrement* avec des minéraux *assimilables*, *vitaminés* si les animaux ne sont pas exposés quotidiennement aux radiations solaires.

CHAPITRE II

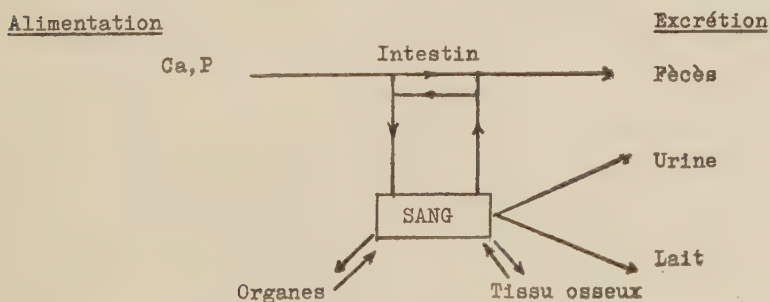
PHOSPHORE ET CALCIUM CHEZ LES ANIMAUX SAINS : LE PROBLEME PHYSIOLOGIQUE

I. — Grandes lignes du métabolisme.

Les grandes lignes du métabolisme phosphocalcique sont assez bien connues : après avoir été absorbés par l'intestin, le phosphore et le calcium se trouvent dans le sang qui joue le rôle de milieu intérieur. Il conduit les éléments reçus aux divers organes qui les utilisent et récolte les éléments, déjà métabolisés, issus des mêmes organes, pour les éliminer.

C'est lui, en particulier, qui sert de liaison entre le tissu osseux et le milieu extérieur ; cela permet à l'organisme d'accumuler une réserve minérale dans laquelle il pourra éventuellement puiser par l'intermédiaire du sang.

Ce métabolisme général est résumé par le schéma suivant :



II. — L'absorption.

L'absorption, très mal connue, peut être permise d'une part, par une diminution de pH qui solubilise les sels minéraux en transformant, par exemple, les phosphates neutres en

phosphates mono, puis diacides ; d'autre part, grâce aux phosphatases de la bile qui, libérant de l'acide phosphorique à partir de ses esters, aboutissent aux mêmes résultats.

De toute façon, l'absorption est certainement régie par la loi d'action de masse, et le coefficient d'utilisation digestive

besoins
est proportionnel au rapport $\frac{\text{absorption}}{\text{apport alimentaire}}$.

Il semble aussi que le calcium et le phosphore soient absorbés conjointement, ce qui explique l'importance du rapport phosphocalcique. Enfin, l'absorption est soumise au facteur vitamine D.

III. — Dans le sang.

Dans le sang, les minéraux s'échangent continuellement entre les différents tissus.

Le phosphore et le calcium qui se trouvent dans le sang ont donc des origines et des destinations si variées qu'elles ne sont pas analysables avec exactitude. Mais il faut remarquer cependant que la calcémie est assez constante et n'est pas influencée par le régime alimentaire. Sa régulation est assurée par l'hormone parathyroïdienne qui relève la calcémie. Allbrigt pense que la parathormone favorise l'excrétion urinaire du phosphore qui se fait seule, sans élimination de calcium, aux dépens de l'élimination fécale qui se fait sous forme de composés insolubles riches en calcium.

La parathormone provoque donc une rétention du calcium dans l'organisme. L'hypoparathyroïdie agit en sens inverse. C'est ce mécanisme qui permet la constance de la calcémie, car la sécrétion de parathormone est précisément sous la dépendance du taux de calcium sanguin.

Au contraire, la phosphatémie est assez variable et influencée par de nombreux facteurs. On compte, généralement, parmi ceux-ci, l'espèce, l'âge, le moment de la mise bas, la lactation, les saisons, le travail musculaire, mais le facteur le plus reconnu et le plus puissant est l'alimentation : il est signalé par tous les auteurs et fera l'objet de la deuxième partie de notre étude.

IV. — Dans les os.

Lorsque le phosphore et le calcium se trouvent dans le sang en quantité suffisante, l'organisme les fixe par un mécanisme inconnu, sur la trame protidique des os. Il peut ensuite les reprendre à l'occasion d'une carence alimentaire.

Cette fonction de réserve que jouent les os, est sous la dépendance de nombreux facteurs plus ou moins connus : l'apport alimentaire abondant et la vitamine D favorisent la fixation alors que les parathyroïdes provoquent la déminéralisation de l'os.

V. — L'excrétion.

Chez la vache laitière, l'excrétion du calcium et du phosphore se fait à partir du sang, par trois voies :

Dans le lait, à raison de 1,5 g/l de calcium et 0,75 g/l de phosphore, en moyenne,

Dans l'urine,

Dans les fèces.

L'excrétion par les fèces est environ neuf fois plus importante que par l'urine et les parathyroïdes régularisent la calcémie en agissant sur l'importance relative de ces deux voies d'excrétion.

CHAPITRE III

PHOSPHORE ET CALCIUM CHEZ LES ANIMAUX MALADES :

LE PROBLEME PATHOLOGIQUE

Le phosphore et le calcium jouent un rôle dans l'étiologie de nombreuses maladies, parmi lesquelles on peut distinguer :

— DES MALADIES AIGUES : paraplégies ante et post-partum, tétanies d'herbage, de voyage, de repos, dont la pathogénie résulte de déséquilibres des ions minéraux du sang.

— DES MALADIES CHRONIQUES, éventuellement marquées de crises aiguës.

Chez les jeunes, le rachitisme est une déminéralisation de l'os amenant son affaiblissement, avec hypertrophie des cartilages de conjugaison et prolifération de tissu ostéoïde.

Chez les adultes, on distingue :

L'ostéofibrose, marquée par un ramollissement des os, des tuméfactions osseuses et, histologiquement, par une métaplasie fibreuse, et observée surtout chez le cheval. Les rations riches en grains amènent une carence en calcium et un excès de phosphore.

L'ostéoporose et l'ostéomalacie, marquées par une déminéralisation des os qui deviennent poreux, plus légers et moins résistants, sont surtout fréquentes chez les bovins. Elles s'accompagnent de pica, de troubles locomoteurs et surtout de troubles génitaux dont l'importance est d'autant plus grande qu'elle est plus souvent méconnue.

DEUXIEME PARTIE

PHOSPHATEMIE ET NATURE DE L'APPORT PHOSPHATE

Il est généralement admis, à l'heure actuelle, que toutes les formes de phosphore, solubles ou insolubles, y compris le phosphore pur, sont assimilables. De nombreuses méthodes ont été proposées pour mettre en évidence l'intérêt des aliments phosphatés : certaines cherchent à prouver que le phosphore alimentaire est absorbé par l'appareil digestif ; d'autres évaluent son effet sur le rendement zootechnique, la minéralisation des os ou sur l'évolution des symptômes d'une carence phosphocalcique, l'ostéomalacie.

La confrontation des résultats obtenus par plusieurs expérimentateurs, employant les différentes méthodes, montre que les aliments phosphorés n'ont pas tous la même valeur zootechnique.

La deuxième partie de notre travail est consacrée à l'étude des méthodes d'appréciation des aliments phosphorés et en particulier, à un test basé sur la détermination de la phosphatémie.

CHAPITRE PREMIER

METHODES D'APPRECIATION DES SELS MINERAUX

I. — Méthodes *in vitro*.

Ces techniques s'appuient sur le fait que l'absorption du phosphore et du calcium exige leur solubilisation préalable ; ceci est réalisé, entre autres moyens, par les variations de pH que subissent les aliments depuis leur arrivée dans l'estomac jusqu'à leur élimination par les fèces.

Les expérimentateurs tentent de reproduire ce phénomène en plaçant les minéraux étudiés dans des solutions de pH variables. Mais on ne peut obtenir ainsi que des résultats grossiers et de toute façon, non prouvés, car il intervient, chez l'animal, des facteurs biologiques plus ou moins bien connus, comme par exemple, les phosphatases.

Une autre méthode utilisant un rumen artificiel, a été employée par Raun et Anderson.

Il semble qu'elle donne des résultats assez parallèles à ceux qui sont obtenus chez l'animal vivant. Mais le rôle que jouent, dans les conditions naturelles, les facteurs biologiques, interdit de considérer les résultats ainsi acquis, comme prouvés.

II. — Méthodes employées chez l'animal vivant.

a) *Test de l'ostéophagie.*

Cette technique, imaginée par Theiler et ses collaborateurs, a permis de prouver l'efficacité de la poudre d'os et du son comme sources de phosphore. Mais elle n'a qu'une valeur qualitative. De plus, il est difficile d'obtenir, à l'heure actuelle,

des animaux assez carencés. Il est impossible d'appliquer à des animaux moyens les résultats acquis chez des malades.

b) *Vitesse de croissance.*

Employé également par Theiler et souvent repris, ce critère donne des différences probantes lorsque les minéraux comparés ont des valeurs très différentes. En effet, la vitesse de croissance dépend de nombreux autres facteurs qu'il est difficile d'apprécier : la précocité, l'alimentation de base, le parasitisme, le microbisme...

c) *Etude des os après abattage.*

On peut apprécier la richesse des os en minéraux par l'analyse chimique, la résistance à la fracture, l'évaluation du poids d'un os par rapport au poids du corps, l'examen histologique. La valeur des compléments minéraux utilisés est jugée d'après l'action qu'ils ont eue sur la minéralisation des os.

Comme on ne connaît pas l'état de la réserve osseuse au début de la supplémentation, ces tests qu'ont qu'une valeur qualitative.

d) *Etude des os par radiographie.*

Les auteurs sud-africains ont utilisé la radiographie comme moyen complémentaire à la mesure de la vitesse de croissance dans leurs essais de compléments minéraux. Mais ce test n'a été employé jusqu'ici que d'une manière qualitative. A notre avis, il peut cependant donner des résultats plus précis, dans les conditions suivantes :

— Etablissement d'une échelle comparative entre l'opacité des plaques et la teneur phosphocalcique des os, par l'analyse de métacarpes prélevés sur des animaux radiographiés avant leur mort, dans des conditions rigoureusement constantes.

— Evaluation des réserves minérales du vivant des animaux grâce à l'échelle établie, par radiographie, avant et après une période de supplémentation.

— Calcul de la quantité de minéraux retenus par les sujets. On peut, par ce moyen, établir un bilan : au lieu de mesurer les quantités ingérées et excrétées, on mesure la quantité

retenue. La méthode radiographique est équivalente à la classique technique des bilans, mais plus simple à mettre en œuvre ; elle est cependant moins précise. Nous verrons, dans le paragraphe suivant, les inconvénients communs à ces deux méthodes.

e) *Etablissement de bilans digestifs.*

Cette technique exige, pour donner des résultats valables, l'emploi d'isotopes radioactifs, ce qui limite son intérêt. D'autre part, les coefficients d'utilisation digestive mesurés dans des conditions déterminées, ne peuvent pas être appliqués à d'autres animaux, soumis à une alimentation différente et dont les réserves et les besoins ne sont pas les mêmes.

Les deux méthodes que nous venons d'exposer ne permettent, comme les précédentes, qu'une appréciation qualitative de l'efficacité alimentaire des compléments minéraux.

f) *Dosages de phosphatémie.*

De nombreux auteurs ayant remarqué que le principal facteur de variation de la phosphatémie est l'alimentation, on a depuis longtemps utilisé ce moyen comme critère d'assimilabilité du phosphore. Les principaux reproches qu'on peut lui faire sont :

— de masquer une éventuelle réexcrétion du phosphore préalablement absorbé. Cette réexcrétion, montrée par Tillman pour les métaphosphates et par Ammerman, n'influence pas la phosphatémie de bovins normaux. Si la réexcrétion est égale à l'absorption, le niveau de la phosphatémie reste constant.

C'est lorsqu'elle est inférieure que, une partie du phosphore restant dans l'organisme, la phosphatémie s'élève.

— de marquer une très nette augmentation lorsque la quantité de phosphore absorbée est très faible. Les auteurs qui apportent cette critique donnent l'explication suivante : comme les besoins pour le maintien du taux de phosphore sérique sont faibles, la mauvaise utilisation d'un produit assurera un taux sérique normal. Mais sait-on si le premier souci de l'organisme est la constance de sa phosphatémie et si, lorsqu'il reçoit peu de phosphore, il commence par l'accumuler dans son sérum sanguin ? Rossouw obtient pourtant des différences notables de phosphatémie chez des moutons recevant la même alimen-

tation de base et 10, 15 et 30 grammes de poudre d'os. Nous-mêmes avons obtenu des moyennes très variables avec différents compléments minéraux.

En fait, les dosages de phosphatémie sont valables pour l'évaluation des compléments minéraux à condition de tenir compte des facteurs qui font varier leurs résultats.

Ce sera l'objet du deuxième chapitre de notre travail.

CHAPITRE II

VALEUR DES DOSAGES DE PHOSPHATEMIE COMME TESTS D'EVALUATION DES MINERAUX PHOSPHATÉS

I. — Facteurs de variation de la phosphatémie.

a) *L'âge.*

Quelques auteurs ayant déjà signalé des variations de la phosphatémie suivant l'âge, nous nous sommes attachés à vérifier l'influence de ce facteur chez les vaches adultes utilisées dans nos essais de compléments minéraux.

Les moyennes de phosphatémie obtenues avec la même alimentation de base non supplémentée et dans les mêmes conditions d'expérience, semblent, en effet, diminuer quand l'âge augmente : elles passent de 61,9 mg/l chez les vaches de quatre ans, à 53,5 mg/l chez les vaches de six à dix ans, et à 49,5 mg/l chez celles qui ont plus de dix ans (voir tableau, page —?—).

Liégeois, Derivaux et Hennaux donnent les valeurs suivantes :

- en dessous de 2 ans : 67 mg/l
- en dessus de 2 ans : 55 mg/l

b) *L'état de gestation et de lactation.*

Les mêmes auteurs affirment que la phosphatémie est plus élevée en fin de gestation que pendant la pleine lactation : ils donnent une moyenne de 61 mg/l dans le premier cas et de 49 mg/l dans le deuxième.

Charton suit la phosphatémie pendant un cycle de reproduction chez des brebis et ne relève aucune variation caractéristique.

Nos résultats personnels n'indiquent pas non plus de grandes variations : les moyennes, obtenues en dehors de toute supplémentation, chez les vaches en gestation avancée (trois derniers mois) en début de lactation (trois premiers mois) ou en pleine lactation, sont voisines ; elles sont respectivement de 54,7 mg/l, 53,1 mg/l et 55,4 mg/l.

c) *La saison.*

Theiler et Green ont montré que l'intensité de l'ostéophagie variait, dans les conditions naturelles de l'élevage en Afrique du Sud, avec les saisons. Ils ont pu établir un rapport entre la pluviométrie, la teneur en minéraux des herbages et l'ostéophagie : la saison des pluies amène une meilleure croissance de l'herbe qui, plus riche en phosphore, supprime la carence. Les saisons agissent donc par l'intermédiaire de l'alimentation, en l'enrichissant ou l'appauvrissant, de la même façon que les engrais phosphatés essayés par Theiler dans la ferme d'Armoedsvlakte.

Cantiget note d'une manière précise que l'ostéomalacie chez la vache laitière se manifeste à la fin d'un hiver faisant suite à un été sec.

d) *Le travail musculaire.*

Il nous a été impossible de vérifier l'influence du travail musculaire sur la phosphatémie, nos animaux d'expérience étant restés en stabulation.

e) *L'alimentation.*

C'est le déterminant tout puissant du taux de phosphore inorganique du sérum ; il est universellement reconnu.

Theiler et Green ont montré que l'hypophosphatémie est le premier symptôme de la carence phosphocalcique. Leurs compatriotes Rossouw et Malan ont montré que la phosphatémie augmente quand on ajoute à la ration de base, différents compléments minéraux et en particulier de la poudre d'os.

On admet généralement qu'au cours de l'ostéomalacie, la phosphatémie varie de 13 mg/l à 28 mg/l, avec une moyenne de 17 mg/l. Pourtant, Salanson affirme que « au cours du rachitisme et de l'ostéomalacie, l'hypocalcémie et l'hypophosphatémie

(qu'il appelle d'ailleurs hypophosphorémie !) semblent n'être ni des prodromes valables, ni des symptômes constants ».

Cette conclusion ne s'appuie sur rien en ce qui concerne le rachitisme.

D'autre part, tous les auteurs reconnaissent que la calcémie est constante en dehors des névroses et tétanies dues à des déséquilibres ioniques.

Enfin, le régime expérimental employé par l'auteur ne nous semble pas réaliser une carence phosphorée.

Besoins, d'après les normes de Morrisson :

20 g de phosphore,
24 g de calcium.

Ration expérimentale :

15,25 g de phosphore	}	il n'est pas tenu compte, dans cette évaluation, du phosphore apporté par :
25,75 g de calcium		

- 4 kg de paille, soit 0,90 g de P et 1 g de Ca,
- 10 kg de betteraves, soit 2,5 g de P et 2,5 g de Ca,
- 12 kg de pommes de terre, soit 2,5 g de P et 2,5 de Ca.

La ration réelle était donc :

21,15 g de phosphore	Ca	1
		— = —
31,75 g de calcium	P	0,66

Pouvait-on espérer une ostéomalacie ?

La détermination de la phosphatémie est un test valable pour le diagnostic expérimental de l'ostéomalacie, mais elle doit être faite dans des conditions bien déterminées et constantes.

De plus, elle doit être répétée, car la phosphatémie subit des variations quotidiennes assez importantes pour entraîner des erreurs par excès ou par défaut.

De toute façon, son intérêt pratique n'est que très relatif.

Avec une alimentation satisfaisante en calcium et en phosphore, les valeurs moyennes de la phosphatémie données par les différents expérimentateurs sont comprises entre 45 et 60 mg/l.

Pendant notre expérimentation, les 190 dosages effectués alors que les animaux recevaient la seule alimentation de base,

ont donné une moyenne de 54 mg/l avec un écart-type de 7,4 mg/l.

Lorsque les bovins reçoivent une alimentation supplémentée, la phosphatémie augmente notablement. Groenewald, distribuant 75 g de phosphate bicalcique, obtient une moyenne de 72 mg/l.

Nous-mêmes avons noté, en distribuant 100 g. de chacun des phosphates de calcium et 50 g. de phosphate monosodique, des moyennes allant de 66 mg/l à 69 mg/l.

Nous pouvons donc tenir pour certaine, l'influence de l'alimentation sur la moyenne de la phosphatémie. Cependant, lorsque des vaches sont soumises aux mêmes conditions, alimentaires en particulier, on observe des fluctuations dans le taux de phosphore inorganique du sérum. Ces variations, très rapides puisqu'elles se font dans la même journée (Charton) sont sous l'influence de facteurs plus ou moins connus.

f) Les facteurs physiologiques.

La phosphatémie n'est pas une constante au même titre que la calcémie ou la température. En effet, elle semble varier suivant l'intensité du métabolisme. Elle est sous la dépendance d'hormones et de vitamines.

Ainsi, l'hormone parathyroïdienne augmente la phosphatémie, la vitamine D l'abaisse.

Il est donc important de ne pas tirer de conclusion à partir d'un ou de quelques dosages de phosphatémie. Au contraire, une moyenne calculée sur un nombre suffisant de prélèvements paraît valable, aussi bien pour le diagnostic de la carence phosphocalcique que pour l'évaluation de l'efficacité biologique d'un complément minéral.

II. — La phosphatémie, test d'efficacité des minéraux phosphatés.

Connaissant les facteurs qui déterminent la phosphatémie, il est possible de les contrôler et de mesurer avec plus de précision l'influence de chacun d'eux. Seuls, les facteurs de variation quotidienne, qui sont métaboliques et donc mal définis, sont incontrôlables, mais il est possible d'en supprimer les

effets, grâce à une analyse statistique de résultats assez nombreux.

C'est ainsi qu'on peut, en faisant varier le seul facteur alimentaire, établir un parallélisme entre le taux de phosphore assimilable de la ration et la phosphatémie.

Par exemple, dans un milieu donné, on peut établir l'échelle suivante :

— alimentation de base	Phosphatémie = X
— + 25 g phosphate bicalcique	» = X + a
— + 50 g » » »	» = X + b
— + 75 g » » »	» = X + c
— + 100 g » » »	» = X + d
— + 100 g complément à tester	» = X + x

Si, par exemple, x est égal à b, on peut dire que 100 g du complément essayé sont équivalents à 50 g de phosphate bicalcique.

Le phosphate bicalcique étant, tous les auteurs l'affirment, parfaitement assimilable, il peut être choisi comme étalon de comparaison. Il s'agit là d'une méthode analogue à celle des unités fourragères : 100 g de phosphate bicalcique correspondent à une unité-phosphore ; le complément de l'exemple vaut 0,5 unité-phosphore.

Il nous reste à prouver le parallélisme entre les échelles de phosphatémie et de phosphore assimilable et l'analogie des résultats, quelles que soient les conditions expérimentales.

1. — PARALLÉLISME ENTRE LES ÉCHELLES DU PHOSPHORE SÉRIQUE ET DU PHOSPHORE ALIMENTAIRE.

Au cours de notre expérimentation, nous avons établi les moyennes de la phosphatémie pendant la distribution de la même alimentation de base, supplémentée avec différents phosphates :

200 g de phosphate bicalcique apportent	36 g de phosphore
100 g de phosphate monocalcique apportent	22,5 g de phosphore
100 g de phosphate bicalcique apportent	18 g de phosphore
100 g de phosphate tricalcique apportent	13 g de phosphore

Nous avons procédé de même avec deux mélanges minéraux :

200 g de mélange III apportent	28 g de phosphore
200 g de mélange II apportent	20 g de phosphore
100 g de mélange III apportent	14 g de phosphore
100 g de mélange II apportent	10 g de phosphore

L'échelle-étalon s'établissait ainsi :

Supplément de phosphore apporté à la ration (en g)	Augmentation de la phosphatémie (en mg/l)
36	+ 24,5
22,5	+ 16,8
18	+ 15,4
13	+ 12,7

Les résultats des mélanges testés sont :

28	+ 22,3
20	+ 15,9
14	+ 14,8
10	+ 6,6

Comme l'origine du phosphore présent dans les mélanges II et III est du phosphate bicalcique, la place qu'ils prennent dans l'échelle-étalon est bien celle que l'on pouvait attendre.

2. — CONSTANCE DES RÉSULTATS QUAND LES CONDITIONS EXPÉRI- MENTALES VARIENT.

Si l'on change l'un des facteurs de variation de la phosphatémie, à condition de le maintenir constant par la suite, pendant la nouvelle série de dosages, on obtient une nouvelle échelle-étalon.

Ses valeurs numériques changent, mais l'ordre des facteurs reste le même : le complément testé dans le premier exemple, donnera une moyenne de phosphatémie $X' + x'$, et x' sera encore égal à b' obtenu avec 50 g de phosphate bicalcique.

En effet, le changement apporté aux conditions expérimentales aura la même influence sur la moyenne de base, sur les valeurs obtenues avec le phosphate bicalcique et avec le produit testé.

Ainsi, deux expérimentateurs opérant loin l'un de l'autre, dans des conditions différentes, obtiendront les mêmes résultats.

III. — Conclusion.

Notre expérimentation, qui fut surtout une mise au point, nous a permis d'approcher le problème. Elle ne donne pas de résultats parfaits pour la méthode que nous préconisons parce que plusieurs facteurs de la phosphatémie étaient simul-

tanément variables : l'âge, la saison, l'état physiologique. Ce n'est que grâce à une analyse statistique d'un assez grand nombre de dosages et à une répartition relativement homogène, en ce qui concerne l'âge et l'état physiologique des vaches de différents lots, que nous avons pu obtenir des résultats valables.

TROISIEME PARTIE

TRAVAIL PERSONNEL

Nos expériences ont consisté en des dosages réguliers de la phosphatémie et de la calcémie dans le sérum de vingt-deux vaches laitières.

Celles-ci étaient nourries avec une alimentation de base que nous avons complétée successivement avec différents compléments minéraux.

Ainsi, nous avons pu étudier les répercussions, sur la phosphatémie des vaches laitières, de différents phosphates : monocalcique, bicalcique, tricalcique, monosodique, aluminoferrocalcique.

CHAPITRE PREMIER

EXPÉRIMENTATION

I. — Le milieu

1. — Géographie.

Notre expérimentation a été effectuée sur le bétail bovin de l'exploitation des Automobiles M. Berliet, à Saint-Priest (Isère). Cette ferme est située dans l'immense plaine qui s'étend, au sud-est de Lyon, jusqu'à Heyrieux : « quarante-cinq bons kilomètres à travers les pauvres froments de Planaise, où il n'y a ni un arbre, ni un cabaret... », écrit Henri Béraud.

Notons aussi qu'il n'y a pas le moindre ruisseau, la moindre mare.

2. — Pédologie.

La plaine a été formée à l'étage Mindélien de l'ère quaternaire par les glaciers lyonnais : la moraine de fond a laissé ses molasses, ses graviers et ses sables ; les moraines latérales ont formé quelques talus, qu'on qualifie généreusement de collines.

Sur ce sous-sol très perméable, la terre arable ne dépasse jamais 40 cm ; elle est brunâtre, très siliceuse, mêlée de galets quartzeux.

Son analyse (tableau n° 1) montre une teneur très faible en éléments colloïdaux et en calcaire.

3. — Climatologie.

Ce triste bilan pédologique est encore aggravé par la climatologie : le vent du Nord est presque constant en hiver ; le

printemps et l'automne, par contre, sont dominés par le vent du Sud qui amène les pluies.

La pluviosité, assez abondante, se caractérise par de fortes précipitations portant sur un faible nombre de journées.

L'été est très chaud et sec, l'hiver froid.

4. — Agronomie.

La terre, facile à cultiver, légère, mais pauvre et sèche, ne permet pas des rendements élevés. On y cultive des céréales, des prairies artificielles, quelque peu de vigne et des prairies temporaires de mauvaise qualité.

Par années pluvieuses, pommes de terre et betteraves sont récoltées en quantités satisfaisantes.

TABLEAU N° 1

Analyses de sol de la ferme expérimentale (résultats donnés par le Laboratoire départemental de Villefranche)

	Echantillon I	Echantillon II
<i>Analyse physique</i>		
Terre fine	95,8 %	85 %
Sable siliceux	80,8 %	72,12 %
Argile	11,8 %	8,4 %
Calcaire	0,7 %	0,9 %
Débris organiques	2,2 %	3,2 %
Humus	0,34 %	0,4 %
<i>Analyse chimique</i>		
Azote	0,115 %	0,148 %
Acide phosphorique assimil.	0,122 %	0,298 %
Potasse assimilable	0,084 %	0,080 %
Chaux	0,880 %	0,810 %
Magnésie	0,330 %	0,310 %

II. — Le bétail

Dans un tel milieu, l'élevage n'est permis que par la culture de fourrages artificiels, la supplémentation avec des aliments concentrés et l'utilisation d'une race rustique de faible format.

C'est pourquoi est utilisée avec succès la race « Brune des Alpes » : bonne laitière (ses rendements sont en moyenne de 4.000 kilos de lait par an, avec un taux butyreux de 36 %), elle est cependant très rustique et très sobre. Elle est appréciée en boucherie pour sa qualité et son rendement en viande nette. Le poids vif de nos animaux d'expérience était en moyenne de 600 kilos.

A ces qualités, s'ajoute pour nous la constance de ses caractères génétiques : isolée depuis l'antiquité, elle est très homogène.

Cela explique peut-être la relative constance de nos résultats expérimentaux.

III. — L'alimentation

1. — Alimentation de base.

Pendant la période de stabulation hivernale, chaque vache reçoit quotidiennement environ 7 kilos de foin, 3 kilos de paille hachée et mélangée à 30 kilos de cossettes de betteraves, 1 kilo de tourteau d'arachides.

Cette alimentation couvre les besoins moyens des vaches laitières pesant 600 kilos lorsqu'elles produisent 10 litres de lait par jour.

Un complément de 0,500 kilo de tourteau d'arachides pour 5 litres de lait produits en supplément, est distribué pendant la lactation.

L'eau de boisson contient 110 mg/l de calcium et une quantité indosable de phosphore. On peut estimer à 60 litres, le volume d'eau ingéré chaque jour par une vache.

Les résultats des analyses d'aliments (tableau n° 2) permettent de calculer l'apport phosphocalcique moyen pendant

la durée de l'expérimentation : chaque vache reçoit 32 grammes de phosphore et 110 grammes de calcium par jour.

On peut admettre que la proportion de minéraux assimilables par rapport aux minéraux totaux est égale au pourcentage des matières azotées digestibles par rapport aux matières azotées totales.

Ce coefficient, calculé d'après nos analyses, est de 60 %.

L'alimentation de base (tableau n° 3) apporte donc 19,2 grammes de phosphore assimilable et 66 grammes de calcium assimilable.

Les bêtes ainsi nourries recevaient du calcium en excès et une quantité à peine suffisante de phosphore.

TABLEAU N° 2

Résultats des analyses d'aliments

	Foin	Paille	Betterav.	Tourteau arachides
Matière sèche %	85	85	13	90
Humidité %	15	15	87	10
Matière azotée (Nx6,25)	8,57	2,231	1,40	49,612
Matière azotée digestible %	5,1	1,12	0,7	41,030
M.A.D. — × 100 M.A.	60	50	50	82,7
Cellulose Weende %	25,75	39,1	0,85	5,40
Cendres %	7,225	3,145	1,03	4,59
Extrait éthéré %	2,159	1,26		0,82
Extractif non azoté %	42,451	39,264		29,578
Phosphore %	0,195	0,042	0,039	0,549
Calcium %	1,11	0,215	0,058	0,090
U.F./100 kg	45,22	30	10	110

TABLEAU N° 3

Ration alimentaire de base

	M. S. kg	Weende kg	M.A.D. kg	U. F.	Phosphore en g.		Calcium en g.	
					Total	Assim.	Total	Assim.
Foin 7 kg/jour	5,95	1,95	0,357	3,165	13,65	8,19	77,7	46,62
Paille 3 kg/jour	2,55	1,17	0,042	0,90	1,26	0,63	6,4	3,20
Betteraves 30 kg/jour	3,90	0,25	0,300	3,00	11,70	5,85	17,4	8,70
Tourteau arach. 1 kg/jour	0,90	0,06	0,410	1,10	5,49	4,56	0,9	0,75
Eau 60 l/jour	—	—	—	—	Traces	Traces	6,6	6,60
Ration totale	13,30	3,43	1,109	8,165	32,10	19,23	109,0	65,87

2. — Sels minéraux.

Les compléments minéraux employés ont été analysés avant le début de l'expérimentation. Leur composition est donnée par le tableau n° 4.

Pour chacun d'entre eux, une mesure a été préparée afin de permettre une distribution régulière.

Nous utilisons d'une part, des produits chimiquement purs, d'autre part, des compléments minéraux du commerce.

Ces derniers sont appelés dans l'expérimentation :

— Mélange n° 1 :

phosphate alumino-ferro-calcique naturel calciné à 700°C et broyé, contenant 15 % de phosphore, 7 % de calcium, 6 % de fer, 19 % d'aluminium, 3 % de silice et 1,1 % de fluor.

— Mélange n° 2 :

phosphate bicalcique ..	62	%
carbonate de chaux	16	%
chlorure de sodium	18	%
carbonate de magnésie ..	0,5	%
vitamine A	6.000.000	u.i. par 100 kg
vitamine D	1.500.000	u.i. par 100 kg

— Mélange n° 3 :

phosphate bicalcique ..	85	%
chlorure de sodium	11	%
carbonate de magnésie ..	0,5	%
vitamine A	6.000.000	u.i. par 100 kg
vitamine D	1.500.000	u.i. par 100 kg

TABLEAU N° 4

Minéraux	P %	Ca %	Ca/P	F %	Insoluble chlorh. %
Carbonate de chaux	—	40	—	—	—
Mélange n° 1 ..	15	7	0,5	1,1	7
Mélange n° 2 ..	10,812	20,66	2	—	0,2
Mélange n° 3 ..	14,824	19,55	1,3	—	1,4
Phosphate monocalcique .	22,5	15	0,66	0,3	—
Phosphate bicalcique	17,5	22,5	1,3	—	—
Phosphate tricalcique ...	13	40	3	—	—
Phosphate monosodique .	26	—	—	—	—
Fluorure de sodium ...	—	—	—	45	—

IV. — Technique des dosages

1. — Détermination de la calcémie :

Spectrophotométrie de flamme.

Le zéro photométrique est établi à l'aide d'une solution de compensation et l'étalonnage est fait avec une solution de composition connue. Les mesures sont faites sur le sérum dilué vingt fois.

2. — Détermination de la phosphatémie :

Méthode de Briggs.

En présence d'un excès d'acide molybdique, l'acide *ortho-phosphorique* forme un complexe, l'acide phosphoduodécimomolybdique, de formule : $\text{PO}^4\text{H}^3, 12 \text{ MoO}^3$.

Ce complexe est aisément réductible par le mélange d'hydroquinone et de bisulfite de sodium, en sous-oxydes de molybdène.

La coloration bleue de ces sous-oxydes, dont l'intensité est proportionnelle au taux des orthophosphates, est facilement mesurable au photolorimètre.

Le sérum est déprotéinisé par l'acide trichloracétique et filtré ; sur le filtrat, on fait agir le réactif molybdique. Le phosphomolybdate jaune obtenu est réduit par l'hydroquinone et le sulfite de sodium. L'intensité de la coloration bleue obtenue est proportionnelle à la teneur du filtrat en ion phosphate.

RÉACTIFS :

- acide trichloracétique à 20 % ;
- réactif molybdique : 25 g de molybdate d'ammonium, sont dissous dans 30 ml d'eau distillée ; on ajoute 75 ml d'acide sulfurique concentré, dilué dans 125 ml d'eau distillée ;
- hydroquinone en solution à 1 % dans l'eau distillée, en présence de 4 gouttes d'acide sulfurique concentré ;
- sulfite de sodium en solution à 20 % dans l'eau distillée ;
- solution étalon de phosphate monopotassique pur correspondant à 10 mg/l.

TECHNIQUE :

- prélèvement du sérum sanguin : pour chaque série de dosages, il a lieu 24 heures après la prise de sang ;
- déprotéinisation :
 - 2 ml de sérum,
 - 6 ml d'eau distillée,
 - 2 ml d'acide trichloracétique à 20 %, agiter, filtrer.
- dosage :

après un repos de 30 mn, la lecture est faite à l'électrophotomètre de Meunier, avec écran 72 et diaphragme 10, dans la cuve Rufisque 10 mn.

1° Absorption de base :

réactif molybdique	1 ml
hydroquinone	1 ml
sulfite de sodium	1 ml
eau distillée	17 ml

2° Tube réactionnel :

filtrat	5 ml (soit 1 ml de sérum)
réactif molybdique	1 ml
hydroquinone	1 ml
sulfite de sodium	1 ml
eau distillée	12 ml

On enlève à la valeur trouvée pour le tube réactionnel, la valeur de l'absorption de base.

Le poids de phosphore inorganique est, en milligrammes par litre, égal au chiffre ainsi obtenu.

V. — Chronologie des essais

Des prélèvements de sang sont effectués, avant le début des essais, les 26 novembre, 3 décembre et 12 décembre 1962.

Première expérimentation.

Le 13 décembre, commence la première expérimentation ; avec l'alimentation de base sont distribués, chaque jour :

- 100 g de carbonate de calcium aux vaches n° 1, 2, 3 et 4.
- 100 g de phosphate bicalcique aux vaches n° 5, 6, 7, 8 et 9.
- 100 g de mélange n° 2 aux vaches n° 10, 11, 12, 13 et 14.
- 100 g de mélange n° 3 aux vaches n° 15, 16, 17 et 18.

Les vaches n° 19, 20, 21 et 22 constituent un lot-témoin, recevant l'alimentation de base seule.

Des prélèvements de sang sont effectués les 19 décembre 1962 et les 3, 8, 10 janvier 1963.

Les prélèvements du 8 janvier ne donnent pas lieu à des dosages car l'exsudation du sérum ne s'est produite sur aucun des 22 échantillons. La vaccination anti-aphteuse ayant été pratiquée le 4 janvier, nous supposons qu'il existe un rapport entre cette intervention et la non-exsudation du sérum sanguin.

Les doses de chacun des compléments sont doublées le 11 janvier et des prélèvements effectués le 24 janvier.

La distribution des compléments est stoppée le 25 janvier et du sang prélevé les 31 janvier et 6 février.

Deuxième expérimentation.

Avec l'alimentation de base sont distribués chaque jour, à compter du 7 février :

- 100 g de mélange n° 1 aux vaches n° 1, 2, 3 et 4.
- 100 g de mélange n° 1 et 50 g. de carbonate de calcium aux vaches n° 5, 6, 7, 8 et 9.
- 100 g de mélange n° 1 et 100 g de carbonate de calcium aux vaches n° 10, 11, 12, 13 et 14.
- 100 g de mélange n° 2 aux vaches n° 19, 20, 21 et 22.

Les vaches n° 15, 16, 17 et 18 constituent le lot-témoin.

Les prélèvements sont effectués les 14, 21 février, 6 et 20 mars.

La distribution des compléments est stoppée le 21 mars et on fait des prélèvements le 29 mars.

A partir du 16 avril, les vaches sont mises au pré chaque jour. Un nouveau dosage de la phosphatémie le 22 avril montre que ce changement d'alimentation n'a pas de répercussion notable sur le taux du phosphore sérique : sa moyenne est de 57,6 mg/l.

Troisième expérimentation.

A partir du 23 avril, sont distribués chaque jour :

- 50 g de phosphate monosodique aux vaches n° 1, 2, 3, 4 et 5.
- 100 g de phosphate monocalcique aux vaches n° 6, 7, 8, 10 et 12.
- 100 g de phosphate tricalcique aux vaches n° 18, 19, 20, 21 et 22.

Les vaches n° 13, 14, 15, 16 et 17 constituent le lot-témoin.

Les prélèvements sont effectués les 29 avril, 6, 13 et 20 mai. La distribution des compléments est stoppée le 21 mai et les prélèvements sont répétés le 27 mai.

Quatrième expérimentation.

A partir du 28 mai, sont distribués chaque jour :

- 2 g de fluorure de sodium et 100 g de phosphate bicalcique
aux vaches n° 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 et 12.
- 2 g de fluorure de sodium aux vaches n° 13, 14, 15, 16, 17, 19,
20, 21 et 22.

Les prélèvements sont pratiqués les 10, 17 et 27 juin.

CHAPITRE II

RESULTATS

1. — Calcémie

1. — Calcémie moyenne.

La moyenne de la calcémie, calculé sur 59 dosages, est de 100,4 mg/l.

2. — Calcémie en fonction de l'apport alimentaire.

Contrairement à la phosphatémie, la calcémie se maintient constante lorsqu'on fait varier la ration phosphocalcique (tableau n° 5).

TABLEAU N° 5

Calcémie en fonction de l'apport alimentaire

Compléments employés	Ca/P	Nbre de dosages	Moy. M de calcémie	Ecart-type	M-Mo
CO ³ Ca : 100 g.	4,4	7	100,4	2,5	0
Phosphate bicalcique 100 g.	2,44	9	101,7	2,7	+ 1,2
Mélange n° 2	2,9	10	105,6	2,6	+ 5,2
Mélange n° 3	2,5	7	98,8	3,5	— 1,6
Néant	3	59	100,4 = Mo	3,6	—

Comme la ration de base apporte du calcium en quantité excessive, on peut supposer que la calcémie est maintenue à sa valeur maxima, si bien qu'un apport calcique supplémentaire ne peut plus avoir aucune influence.

Peut-être observerait-on une chute de la calcémie en distribuant une ration effectivement carencée en calcium.

II. — Phosphatémie

1. — Phosphatémie « de base ».

Les 190 dosages effectués pendant que les animaux recevaient la seule alimentation de base ont apporté les résultats suivants :

Phosphatémie moyenne	54,0 mg/l
Ecart-type	7,4 mg/l

Nos résultats ne sont pas assez nombreux pour permettre une analyse statistique de population, car plusieurs facteurs de la phosphatémie interviennent à la fois : l'âge et l'état physiologique notamment.

Nous avons établi la moyenne de la phosphatémie pour chaque animal et pour chaque lot utilisé dans l'expérience : les résultats obtenus pendant la distribution des sels minéraux seront comparés avec les moyennes des « phosphatémies de base » des mêmes animaux, obtenues quand les vaches ne recevaient que « l'alimentation de base » (tableau n° 6).

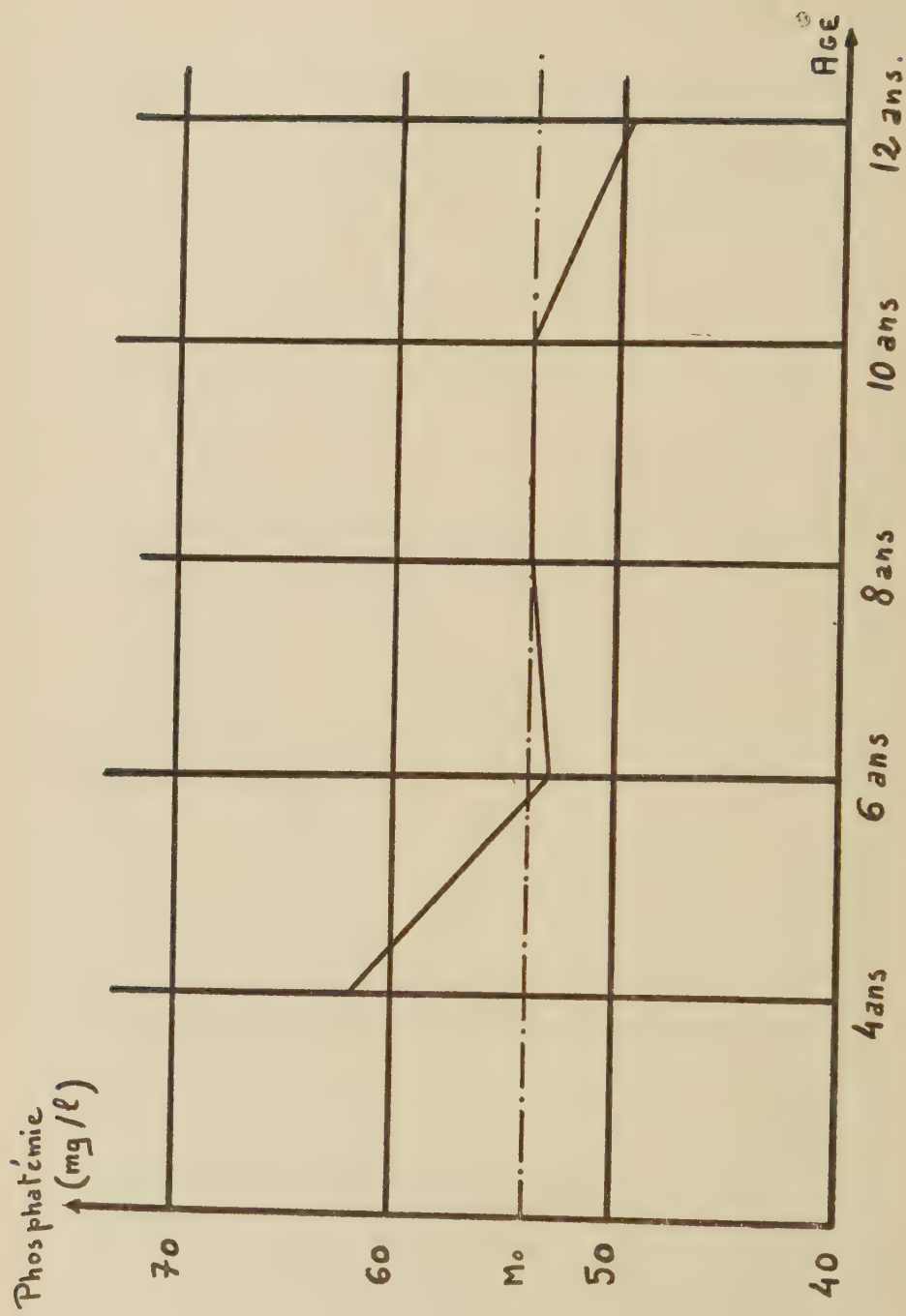
La phosphatémie moyenne calculée d'après nos résultats n'a, bien entendu, qu'une valeur relative. Si l'alimentation de base était différente, on obtiendrait une phosphatémie différente.

Néanmoins, on peut considérer la moyenne obtenue comme valable d'une façon générale, car l'alimentation employée dans l'exploitation est de qualité moyenne.

TABLEAU N° 6

Moyennes de base des lots des 1 ^{re} et 2 ^e expér. mg/l	Vaches n°	Moyenne de base Mo (mg/l)	Moyennes de base des lots de la 3 ^e expérience mg/
A = 51,5	1	48,3	A' = 52,2
	2	54,8	
	3	50	
	4	53	
		55	
B = 49,7	5		B' = 52,2
	6	44	
	7	50,6	
	8	54,3	
	9	50	
C = 59,2	10	49	C' = 56,7
	11	65,5	
	12	63	
	13	57	
	14	61,6	
D = 53,4	15	55,2	D' = 53,5
	16	53,4	
	17	56,5	
	18	48,7	
E = 54,7	19	55,5	
	20	48,1	
	21	58,3	
	22	56,0	

N.B. — Chaque vache d'un lot n'ayant pas fourni le même nombre de données numériques, la moyenne de base d'un lot n'est pas égale à la moyenne des phosphatémies de base des vaches qui composent le lot.



2. — Variations de la phosphatémie suivant l'âge.

Chez les vaches de quatre ans, la moyenne de la phosphatémie calculée sur 21 dosages est : 61,9 mg/l.

Chez les vaches de six à neuf ans, la moyenne calculée sur 92 dosages est : 53,5 mg/l.

Chez les vaches de dix ans, la moyenne calculée sur 35 dosages est : 53,3 mg/l.

Chez les vaches de plus de dix ans, la moyenne calculée sur 42 dosages est : 49,5 mg/l.

3. — Variations de la phosphatémie suivant l'alimentation.

A. — SUIVANT L'APPORT PHOSPHATE.

D'après nos résultats, la phosphatémie varie dans le même sens que l'apport phosphaté : les orthophosphates de calcium et de sodium provoquent une augmentation de phosphatémie proportionnelle à la quantité de phosphore qu'ils contiennent.

Seul, le phosphate alumino-ferro-calcique, associé ou non à du carbonate de chaux, n'influence pas la phosphatémie.

Le tableau n° 7 montre le parallélisme entre la quantité de phosphore ajoutée à la ration de base et l'augmentation de la phosphatémie par rapport à la moyenne de base.

Le phosphate alumino-ferro-calcique du mélange n° 1 ne provoque aucune variation de la phosphatémie. En considérant le schéma du métabolisme (page ???) on constate que, pour expliquer ce phénomène, deux hypothèses sont possibles :

— 1° Le phosphate ne passe pas dans le sang, c'est-à-dire n'est pas absorbé.

— 2° Le phosphate passe dans le sang, mais n'y séjourne qu'un temps si court que la phosphatémie n'en est pas changée.

Du sang, le phosphore peut :

a) être immédiatement réexcrété par voie fécale ou urinaire ;

b) être très rapidement fixé en dehors du sang. Cela paraît peu probable : la fixation dans les tissus mous, si elle est rapide,

est quantitativement très restreinte. La fixation dans les tissus osseux est un phénomène trop lent pour que le séjour du phosphore dans le sang n'amène pas une augmentation de la phosphatémie.

Il n'y a pas de raison pour que le phosphate complexe du mélange n° 1, qui doit perdre son alumine et son fer, soit plus rapidement utilisé que les orthophosphates simples.

TABLEAU N° 7

Minéraux employés	Quantité de phosphore ajoutée à la ration base	Variation de la phosphatémie : M-Mo en mg/l
200 g. phosphate bicalcique	36	+ 24,5
200 g. mélange n° 3	28	+ 22,3
100 g. phosphate monocalcique	22,5	+ 16,8
200 g. mélange n° 2	20	+ 15,9
100 g. phosphate bicalcique	18	+ 15,4
100 g. mélange n° 3	14	+ 14,8
50 g. phosphate monosodique	13	+ 14,5
100 g. phosphate tricalcique	13	+ 12,7
100 g. mélange n° 2	10	+ 6,6
100 g. mélange n° 1	15	— 0,5
mélange n° 1 + 50 g. CO ₃ Ca	15	+ 2,3
100 g. mélange n° 1 + 100 g. CO ₃ Ca	15	— 1,6

La présence de fluor dans le mélange n° 1 n'explique pas la constance de la phosphatémie : dans la troisième partie de notre expérimentation, nous avons montré que l'administration simultanée de phosphate bicalcique et de fluorure de sodium provoque une augmentation de phosphatémie analogue à celle que nous avons obtenue avec le seul phosphate bicalcique.

TABLEAU N° 8

Phosphatémie en mg/l chez les vaches recevant la ration de base, plus :

A — 100 G. DE CARBONATE DE CALCIUM PAR JOUR :

	19-12-62	3-1-63	10-1-63	Moyennes
Vache n° 1	53	52	54	53
Vache n° 2	58	55	59	57
Vache n° 3	57	48	60	55
Vache n° 4	63	—	63	63
Moyennes	58	52	59	56,5

B — 200 G. DE CARBONATE DE CALCIUM PAR JOUR :

	24-1-63
Vache n° 1	47
Vache n° 2	60
Vache n° 3	45
Vache n° 4	48
Moyenne	50

C — 100 G. DE MÉLANGE N° 1 PAR JOUR :

	14-2-63	21-2-63	6-3-63	20-3-63	Moyennes
Vache n° 1	48	47	58	49	50,5
Vache n° 2	50	58	56	46	52,5
Vache n° 3	51	43	39	59	48
Vache n° 4	48	52	50	52	50,5
Moyennes	49	50	51	51,5	50,4

D — 100 G. DE MÉLANGE N° 1 + 50 G. DE CARBONATE DE CALCIUM PAR JOUR :

	14-2-63	21-2-63	6-3-63	20-3-63	Moyennes
Vache n° 5	50	58	58	53	54,7
Vache n° 6	56	56	45	45	50,5
Vache n° 7	70	65	48	51	58,5
Vache n° 8	49	58	54	46	51,7
Vache n° 9	53	34	42	46	43,7
Moyennes	55,6	54,2	49,4	48,2	51,8

E — 100 G. DE MÉLANGE N° 1 + 100 G. DE CARBONATE DE CALCIUM PAR JOUR :

	14-2-63	21-2-63	6-3-63	20-3-63	Moyennes
Vache n° 10	60	58	47	43	52
Vache n° 11	65	65	—	—	65
Vache n° 12	75	70	49	—	65
Vache n° 13	54	64	44	53	54
Vache n° 14	59	63	53	57	58
Moyennes	63	64	48	51	57,6

F — 100 G. DE PHOSPHATE MONOCALCIQUE PAR JOUR :

	29-4-63	6-5-63	13-5-63	20-5-63	Moyennes
Vache n° 6	72	46	43	34	49
Vache n° 7	82	75	63	73	73
Vache n° 8	61	67	74	70	68
Vache n° 10	63	77	74	59	68
Vache n° 12	91	90	73	93	89
Moyennes	73,8	71	65,4	65,8	69

N.B. - Les vaches n° 6 et 12 donnent des résultats aberrants dont les écarts à la moyenne dépassent 20 mg/l. Aucune explication ne nous paraît plausible. En éliminant ces résultats, la moyenne de la phosphatémie s'établit à 70,2 mg/l au lieu de 69 mg/l.

G — 100 G. DE PHOSPHATE BICALCIQUE PAR JOUR :

	13-12-62	3-1-63	10-1-63	Moyennes
Vache n° 5	69	64	51	61
Vache n° 6	70	—	68	69
Vache n° 7	65	65	61	64
Vache n° 8	67	71	73	70
Vache n° 9	69	60	59	63
Moyennes	68	65	62,4	65,1

H — 200 G. DE PHOSPHATE BICALCIQUE PAR JOUR :

	24-1-63
Vache n° 5	78
Vache n° 6	76
Vache n° 7	82
Vache n° 8	73
Vache n° 9	62
Moyenne	74,2

I — 100 G. DE PHOSPHATE TRICALCIQUE PAR JOUR :

	29-4-63	6-5-63	13-5-63	20-5-63	Moyennes
Vache n° 18	75	75	63	65	69,5
Vache n° 19	77	60	64	78	69,75
Vache n° 20	57	55	60	59	57,75
Vache n° 21	67	63	63	65	64,5
Vache n° 22	64	72	71	69	69
Moyennes	68	65	64	67	66

J — 100 G. DE MÉLANGE N° 2.

	19-12-62	3-1-63	10-1-63	Moyennes
<i>Premier lot :</i>				
Vache n° 10	53	55	59	55,7
Vache n° 11	72	73	63	69,3
Vache n° 12	81	76	57	71,3
Vache n° 13	62	56	56	58
Vache n° 14	84	65	67	72

	14-2-63	21-2-63	6-3-63	Moyennes
<i>Deuxième lot :</i>				
Vache n° 19	68	61	52	60,3
Vache n° 20	53	61	59	57,7
Vache n° 21	67	69	65	67
Vache n° 22	61	62	47	56,7
Moyennes	66,8	64,2	58,3	63,2

K — 200 G. DE MÉLANGE N° 2.

	24-1-63
Vache n° 10	54
Vache n° 11	74
Vache n° 13	74
Vache n° 14	88
Moyenne	72,5

L — 100 G. DE MÉLANGE N° 3.

	19-12-62	3-1-63	10-1-63	Moyennes
Vache n° 15	82	—	71	76,5
Vache n° 16	76	62	66	68
Vache n° 17	76	53	74	68
Vache n° 18	79	45	66	63,3
Moyennes	78	53	69	68,2

M — 200 G. DE MÉLANGE N° 3.

	24-1-63
Vache n° 15	81
Vache n° 16	67
Vache n° 18	79
Moyenne	75,7

N — 50 G. DE PHOSPHATE MONOSODIQUE PAR JOUR :

	29-4-63	3-1-63	10-1-63	24-1-63	Moyennes
Vache n° 1	75	62	71	66	68,5
Vache n° 2	59	61	71	65	64
Vache n° 3	63	62	75	68	67
Vache n° 4	68	67	76	76	72
Vache n° 5	69	58	54	68	62
Moyennes	67	62	69,5	68,5	66,7

B. — SUIVANT LE TAUX DE FLUOR DE L'ALIMENTATION.

L'administration de fluorure de sodium ne semble pas avoir d'influence caractéristique, sur la phosphatémie, tout au moins dans les conditions de notre expérience.

TABLEAU N° 9

Phosphatémie en mg/l, dans le sérum sanguin, des vaches recevant la ration de base, plus :

A — 100 G. DE PHOSPHATE BICALCIQUE ET 2 G. DE FLUORURE DE SODIUM PAR JOUR :

Vaches n°	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	Moyennes
10-6-63	49	64	66	65	55	62	66	73	56	70	62,6
17-6-63	53	62	52	55	46	63	76	74	64	99	64,4
27-6-63	54	60	59	65	67	68	66	63	66	83	65,1
Moyenne											64

B — DEUX GRAMMES DE FLUORURE DE SODIUM PAR JOUR :

Vaches n°	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Moyennes
10-6-63	58	67	55	59	62	52	39	53	49	68	56,2
17-6-63	53	64	55	39	56	51	32	43	55	59	50,7
27-6-63	51	50	64	63	68	70	67	65	69	66	63,3
Moyenne											57

III. — Conclusion

L'ensemble de nos résultats est résumé dans le tableau n° 9 qui donne, en fonction des minéraux ajoutés à la ration de base :

— la moyenne M de la phosphatémie pendant la supplémentation ;

— l'écart-type ;

— la différence M - Mo entre la moyenne précédente et la phosphatémie moyenne de base ;

— la moyenne Mo de base du lot employé pour l'essai du minéral ;

— la différence $M - M_0$ entre la moyenne M et la moyenne de base du lot ;

— la ration phosphocalcique totale (ration de base + minéraux ajoutés) avec :

- la quantité quotidienne de phosphore total ingéré,
- la quantité quotidienne de calcium total ingéré,
- le rapport phosphocalcique.

Compléments employés	Nbre de dosages	Moy. M mg/l phos- phatémie	Ecart- type	M - Mo	Mo du lot	M - Mo	Ration totale (Ration base + minéraux du complément)	Ca (g)	Ca/P
CO ³ Ca : 100 g.	15	56,5	5	+ 2,5	51,5	+ 5	32	150	5
Mélange n° 1 : 100 g.	16	51	4,3	— 3	51,5	— 0,5	47,2	110	2,3
Mélange n° 1 : 100 g. CO ³ Ca : 50 g.	20	52	6	— 2	49,7	+ 2,3	47,2	130	2,8
Mélange n° 1 : 100 g. CO ³ Ca : 100 g.	17	57,6	7,5	+ 3,6	59,2	— 1,6	47,2	150	3,2
Phosphate monocalcique : 100 g.	14 20	70,2 69	5,5 11,6	+ 16,2 + 15	52,2	+ 18 + 16,8	54,5	125	2,3
Phosphate bicalcique : 100 g.	19	65,1	5,7	+ 11,1	49,7	+ 15,4	50	132	2,64
Phosphate tricalcique : 100 g.	20	66	5,7	+ 12	53,3	+ 12,7	45	150	3,3
Mélange n° 2 : 100 g.	31	63,2	8,7	+ 9,8	56,6	+ 6,6	42	130	3,1
Mélange n° 3 : 100 g.	14	68,2	8	+ 14,2	53,4	+ 14,8	46	127	2,8
Phosphate monosodique : 50 g.	20	66,7	5	+ 12,7	52,2	+ 14,5	45	110	2,4
Phosphate BiCa : 100 g. Fluorure Na : 2 g.	30	64	7	+ 10	51,7	+ 12,3	50	132	2,64
Fluorure de Na : 2 g.	30	57	6,5	+ 3	55,2	+ 1,8	32	110	3,4
Néant	190	54	7,4	—	—	—	32	110	3,4

CHAPITRE III

RESULTATS GRAPHIQUES

Les graphiques représentent les variations de la phosphatémie, en fonction de l'alimentation.

Dans les graphiques individuels des vaches n° 1, 8, 14, 18 et 22, nous avons jugé bon de réunir artificiellement dans une même échelle de temps, des résultats d'essais qui, en fait, se sont déroulés successivement sur les mêmes animaux.

L'ordonnée correspondant à l'abscisse O donne la valeur moyenne de la phosphatémie de la vache considérée, quand elle reçoit la seule alimentation de base.

Les ordonnées suivantes donnent les valeurs de la phosphatémie, une, deux, trois et quatre semaines après le début de la distribution d'un minéral.

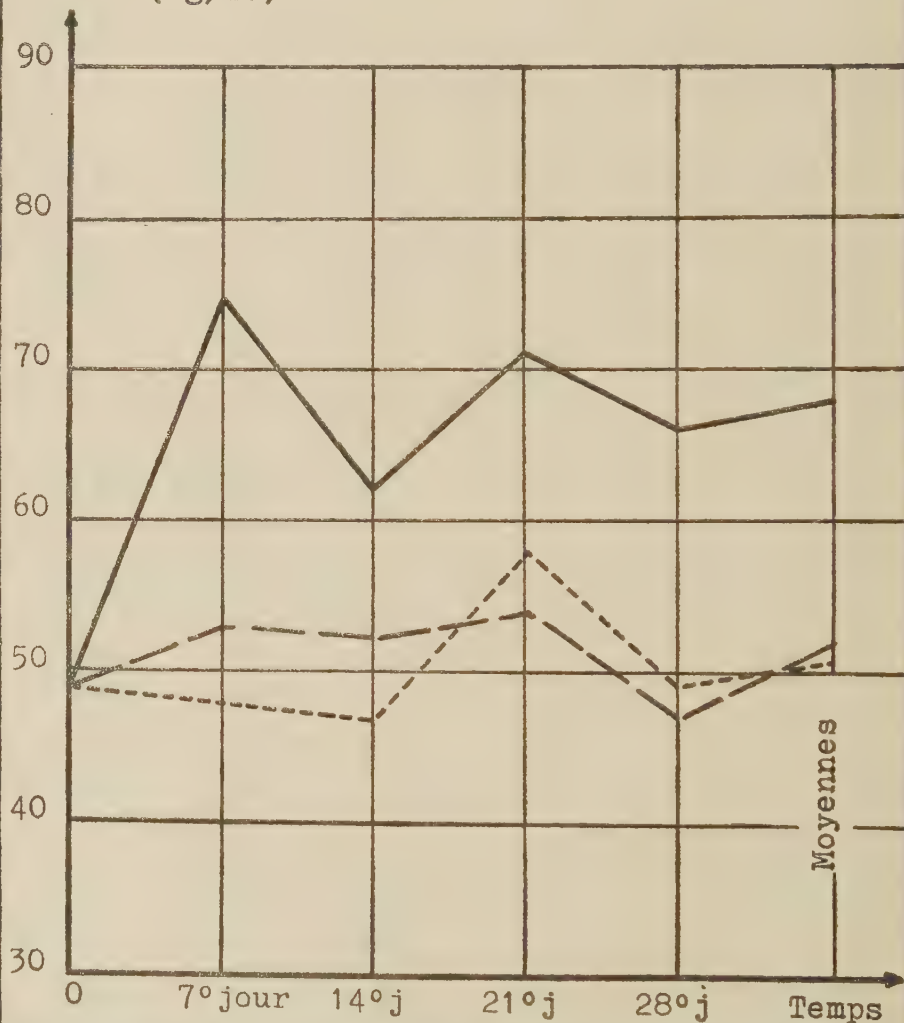
Les ordonnées correspondant à la dernière abscisse donnent les moyennes des quatre valeurs de la phosphatémie déterminées pendant la distribution du minéral considéré.

Dans les graphiques moyens, nous avons noté la différence entre la phosphatémie déterminée pendant la supplémentation et la phosphatémie de base du lot employé pour l'essai.

VACHE N° 1. Influence, sur la phosphatémie,
de l'ingestion de:

- 100g de CO_3Ca ————
- 50g de phosphate monosodique —————
- 100g de mélange I - - - - -

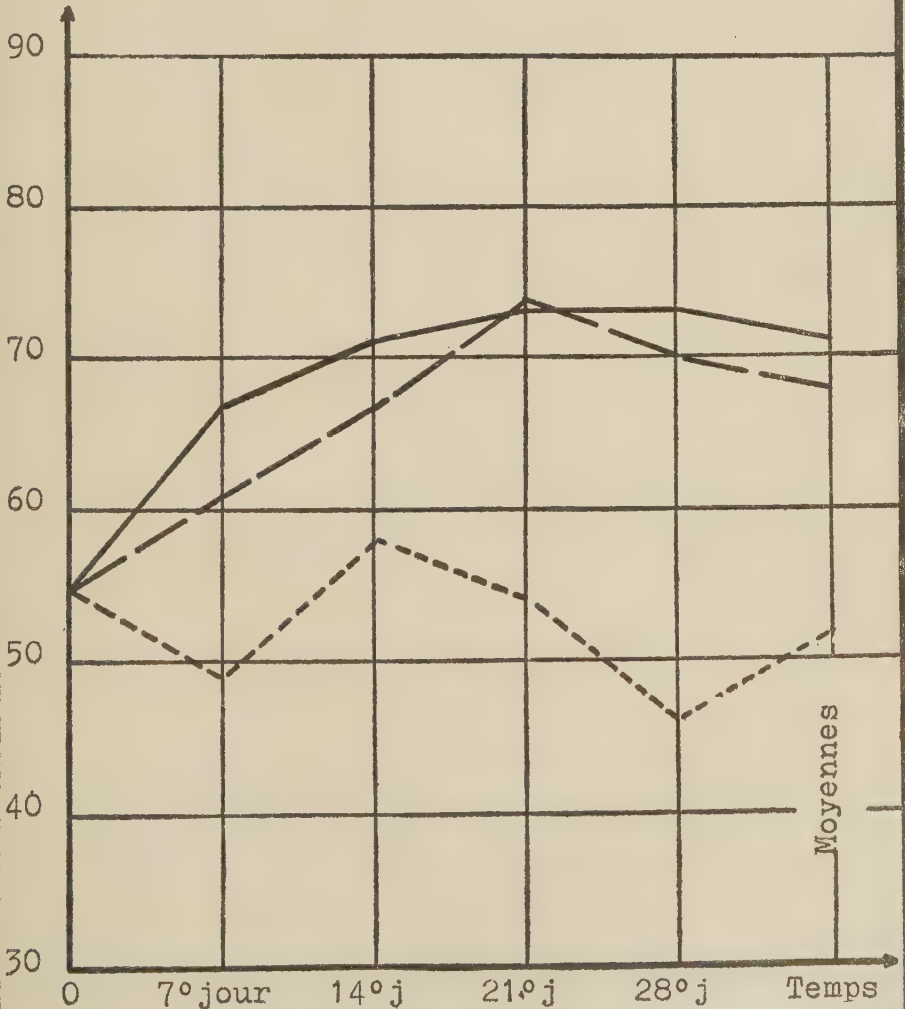
Phémie (mg/l.)



VACHE N° 8. Influence, sur la phosphatémie,
de l'ingestion de:

- 100g de phosphate monocalcique _____
- 100g de phosphate bicalcique -----
- 100g de mél.1 + 50g de CO_3Ca - - - - -

Phémie (mg/l.)

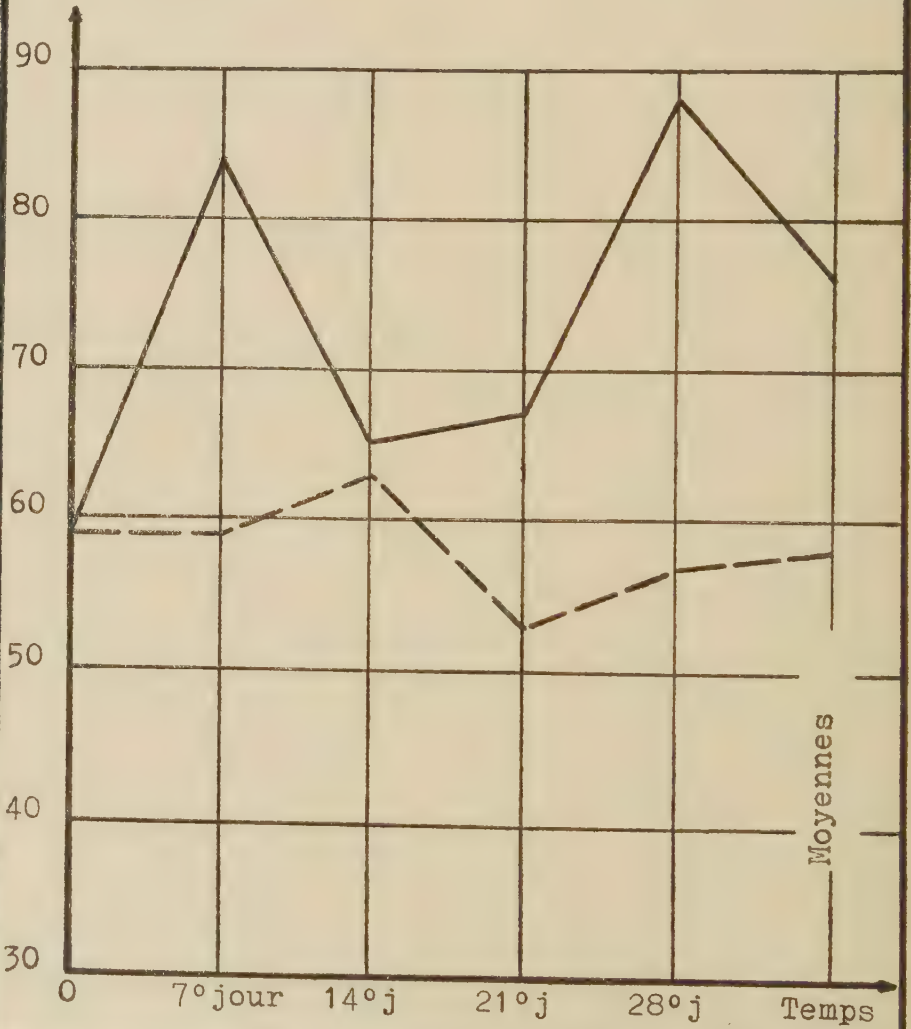


VACHE N° 14. Influence, sur la phosphatémie,
de l'ingestion de:

-100g de mélange 2 _____

-100g de mél.1 + 100g de CO_3Ca -----

Phémie (mg/l.)



VACHE N° 16. Influence, sur la phosphatémie,
de l'ingestion de:

-100g de mélange 3.

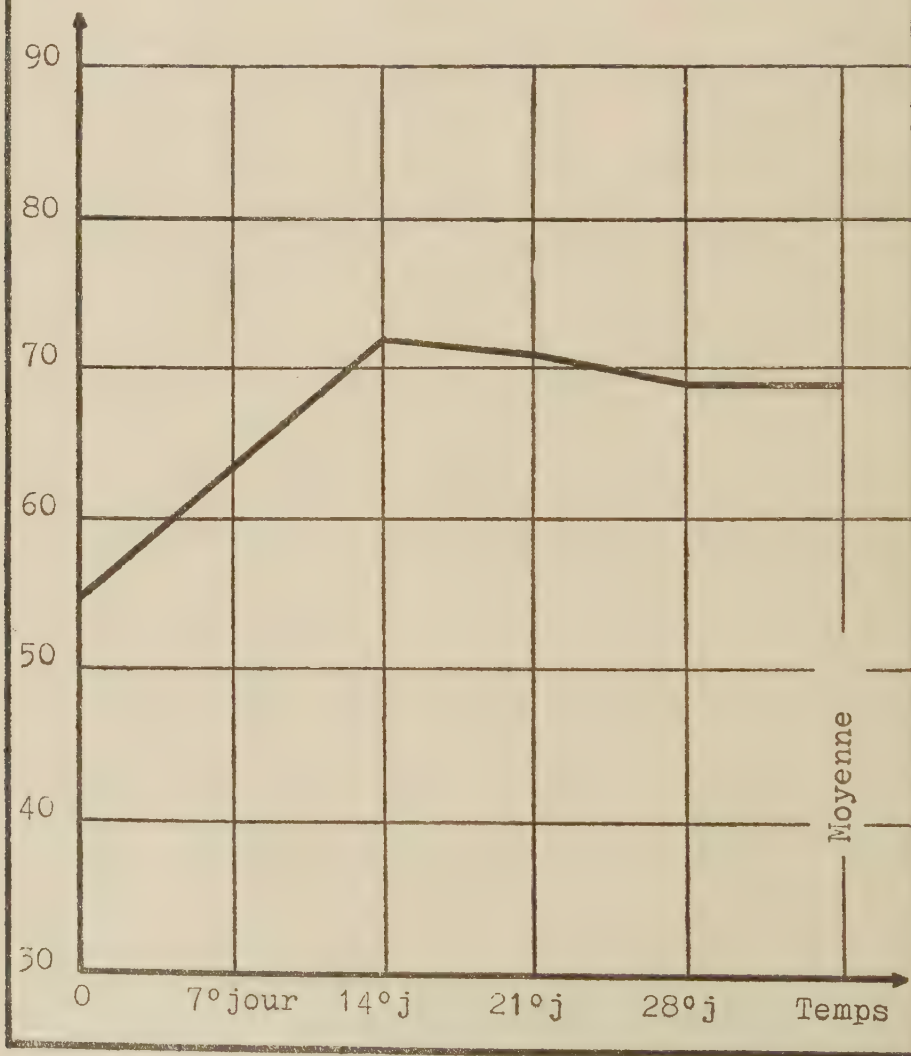
Phémie (mg/l.)



VACHE N° 22. Influence, sur la phosphatémie,
de l'ingestion de:

-100g de phosphate tricalcique _____

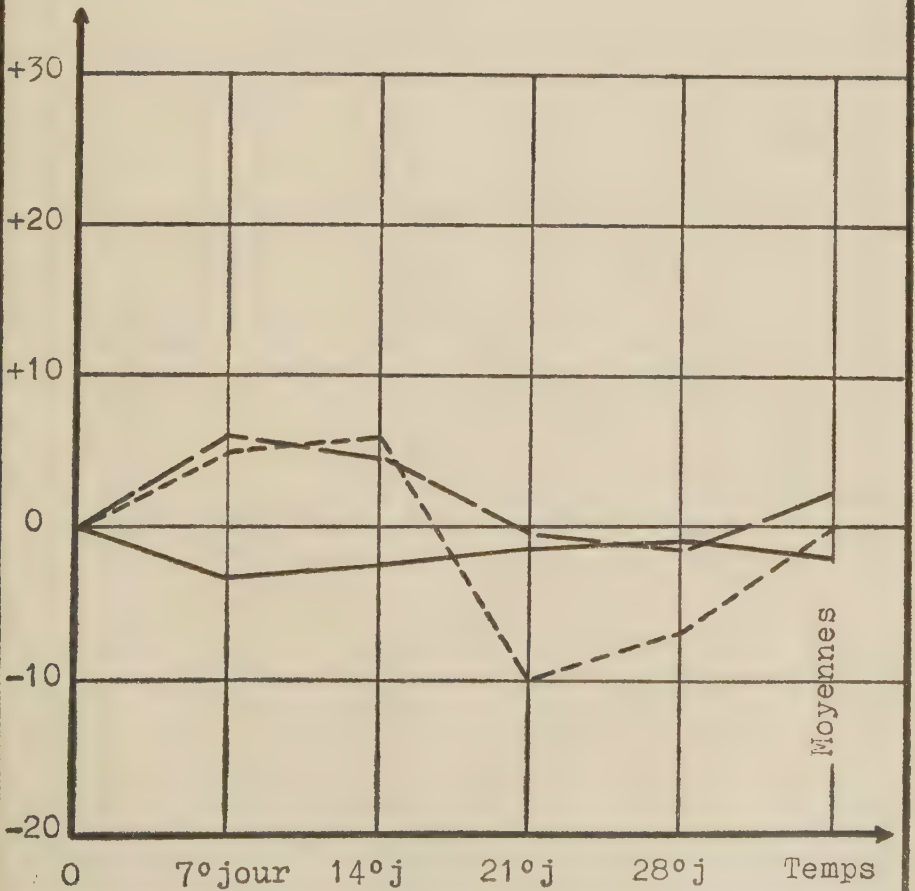
Phémie (mg/l.)



Variations de la phosphatémie par rapport à la moyenne de base d'un lot, prise pour origine des ordonnées, quand on ajoute à la ration de base:

- 100g de mélange 1 _____
- 100g de mél. 1 + 50g de CO_3Ca _____
- 100g de mél. 1 + 100g de CO_3Oa - - - - -

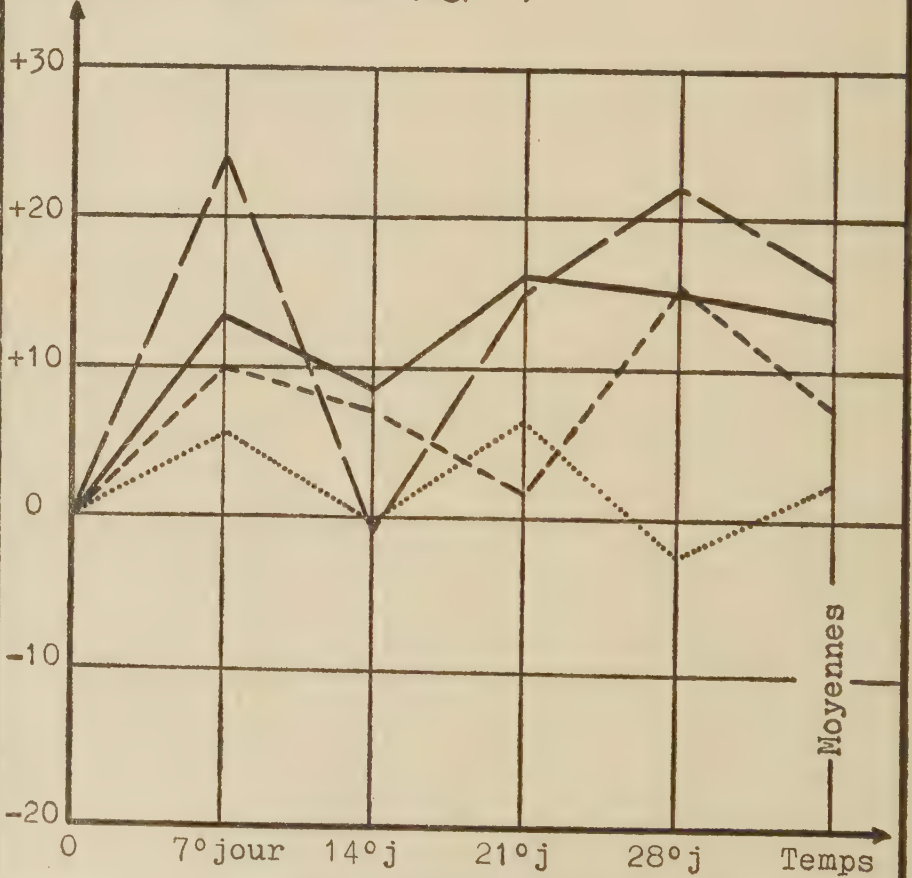
Variations de Phémie (mg/l.)



Variations de la phosphatémie par rapport à la moyenne de base d'un lot, prise pour origine des ordonnées, quand on ajoute à la ration de base:

- 50g de phosphate monosodique —————
- 100g de mélange 3 - - - - -
- 100g de mélange 2 - - - - -
- 100g de CO_3Ca

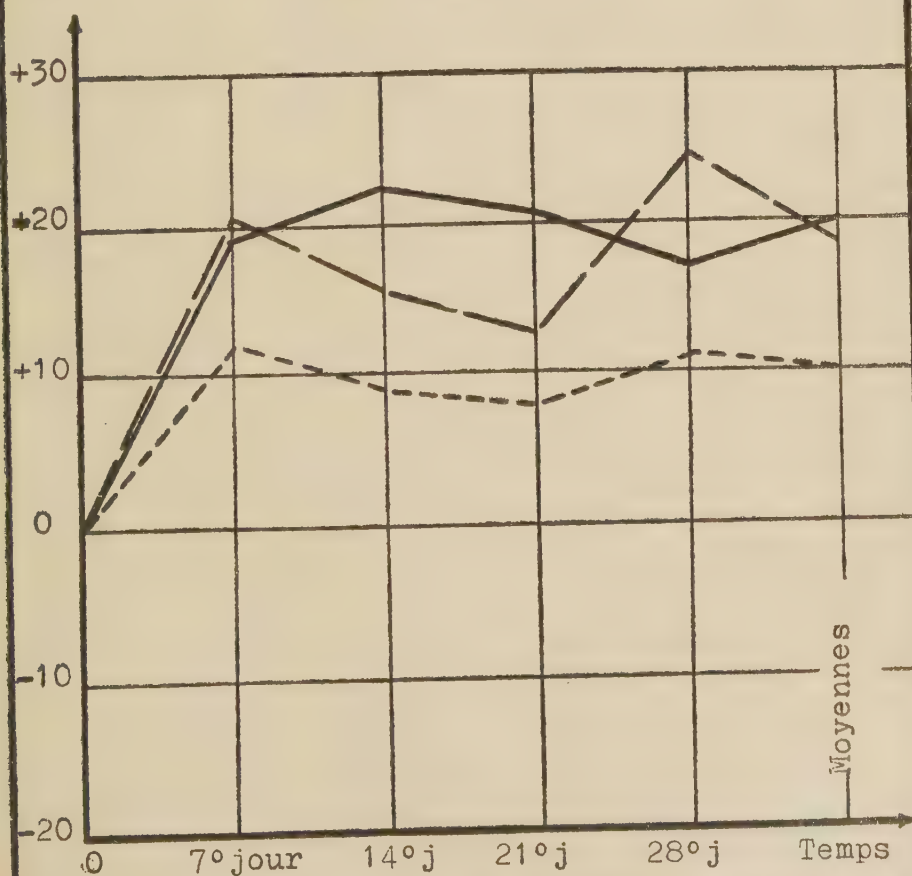
Variations de Phémie (mg/l.)



Variations de la phosphatémie par rapport à la moyenne de base d'un lot, prise pour origine des ordonnées, quand on ajoute à la ration de base:

- 100g de phosphate monocalcique _____
- 100g de phosphate bicalcique -----
- 100g de phosphate tricalcique - - - - -

Variations de Phémie (mg/l.)



CONCLUSIONS

1. — L'apport de calcium par l'eau de boisson n'est pas négligeable : la plupart des eaux potables de France apportent de 4 à 5 grammes de calcium, avec un maximum de 30 grammes par jour, chez les vaches laitières.

2. — Theiler, au cours de ses expérimentations, n'a pas tenu compte de l'apport calcique par l'eau de boisson. Etant donné la nature dolomitique du sol du Transvaal, on peut penser que la ration de base employée par cet auteur était carencée uniquement en phosphore.

3. — Le calcium n'est pas toxique. Theiler, en ajoutant de la craie à la ration de base, ne faisait qu'accentuer le déséquilibre phosphocalcique auquel étaient soumis les bovins.

4. — La carence en calcium peut, tout comme l'aphosphorose, provoquer l'ostéomalacie. Mais elle est plus difficile à obtenir, expérimentalement et naturellement, que la carence en phosphore.

5. — La calcémie des vaches laitières est très constante ; sa moyenne est de 100 milligrammes par litre.

6. — La phosphatémie moyenne des animaux utilisés dans notre expérimentation s'élève à 54 mg/l.

7. — La phosphatémie diminue tout au long de la vie des vaches : elle passe de 61,9 mg/l à 4 ans, à 49,5 mg/l à 10 ans.

8. — L'administration de carbonate de calcium n'a aucune influence sur la phosphatémie.

9. — L'administration de phosphate alumino-ferro-calcique, seul ou associé à des quantités variables de carbonate de calcium, n'a aucune influence sur la phosphatémie.

10. — L'administration des différents orthophosphates de calcium et de sodium en quantités variables, provoque une augmentation de la phosphatémie proportionnelle au supplément de phosphore ainsi apporté.

11. — L'administration de 2 grammes de fluorure de sodium par jour, n'a aucune influence caractéristique sur la phosphatémie.

12. — Il est possible d'apprécier la valeur alimentaire d'un apport phosphaté en comparant son action sur la phosphatémie à celle de différentes quantités d'un phosphate dont la valeur est connue, par une méthode analogue à celle des unités fourragères : on peut ainsi définir une unité-phosphore qui est représentée par 100 grammes de phosphate bicalcique.

Vu : LE DIRECTEUR
DE L'ECOLE NATIONALE VÉTÉRINAIRE,
FLORIO.

Vu :
LE DOYEN
DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE,
J.-F. CIER

Vu :
LE PRÉSIDENT DE LA THÈSE,
COUDERT
PROFESSEUR
DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE.

Vu et permis d'imprimer : Lyon, le 12 Février 1964.

LE RECTEUR, PRÉSIDENT DU CONSEIL DE L'UNIVERSITÉ
P. LOUIS

BIBLIOGRAPHIE

- ADDA (M.). — Carence en calcium chez les bovins du pays d'Auge. *Thèse Doct. Vét. Alfort*, 1949.
- AMMERMAN (C.B.). — Utilization of inorganic phosphates by ruminants. *Ph. D. Thesis*, 1956, University of Illinois.
- AMMERMAN (C.B.), FORBES (R.M.), GARRIGUS (U.S.), NEUMANN (A.L.), NORTON (H.W.) and HATFIELD (E.E.). — Ruminants utilization of inorganic phosphates. *J. Anim. Sci.*, 16, 796-810, 1957.
- AMMERMAN (C.B.), NEUMANN (A.L.), FORBES (A.M.), NORTON (H.W.) and HATFIELD (E.E.). — Utilization of phosphorus from various inorganic sources by steers. *J. Anim. Sci.*, 13, 974, 1954.
- ANDERSON (D.K.), GAYLAY (H.) and PRATT (D.). — Studies on the chemical composition of bovin blood. *J. of Dairy Sci.* XIII, 336-348, 1930.
- ANDERSON (R.), CHENG (E.) and BURROUGHS (W.). — A laboratory technique for measuring phosphorus availability of feeds supplements fed to ruminants. *J. Anim. Sci.*, XV, 489-495, 1956.
- AUFFMAN, ROBINSON, WINTER. — Métabolisme du phosphore et du calcium chez les vaches bonnes laitières. *J. of Dairy Sci.*, XIII, 1930.
- BALLIGAND (P.). — Contribution à l'étude de la fièvre vitulaire. *Th. Doct. Vét. Lyon*, 1958.
- BAUER (W.), AUB (J.C.) and ALLBRIGHT (F.). — Studies of calcium and phosphorus metabolism. A study of the bone trabeculae as a readily available reserve supply of calcium. *J. Exptl. Med.*, 49, 145-161, 1929.
- BECK. — Maladies osseuses des bovidés par carence phosphocalcique. *Thèse Doct. Vét., Alfort*, 1950.
- BECKA (J.). — Magnesium als regulator des calciummetabolismus. *Prager. Archiv. für Tiermedizin und Vergleichende Pathologie*, IX Jahrgang, Teil A., Heft 1, 2, 3, pp. 253-259, 1929.
- Die osteomalacie, ihr entstehen und ihre therapie vom standpunkte der biochemie. *Prager. Archiv. für Tiermedizin und vergleichende Pathologie*, IX jahrgung, Teil A., Heft 1, n. 2, pp. 3-11.

- BECKER (R.B.), NEAL (W.M.) and SHEALY (A.L.). — Salt sick : its cause and prevention. Mineral supplements for cattle. *Florida Agr. Exp. Station Bull.*, 231, 1932.
- Effect of calcium deficient roughages upon milk production and welfare of dairy cows. *Florida Agr. Exp. Station Bull.*, 262, 1932.
- Importance of calcium in dairy ration. *Florida Agr. Exp. Station Bull.*, 457, 1933.
- BEKKER (J.G.). — Phosphorus and iodine supplements in field experiments with sheep. 18th. *Rep. Dir. Vet. Serv. and An. Ind., U. of S-A*, 1932.
- BELLOIR (G.). — Calcémie et phosphatémie chez des bovins entretenus sur les sols acides de la région lyonnaise. *Th. Doc. Vét. Lyon*, 1955.
- BENETATO (G.), OPRISIU (G.), TUDORAS (T.), KOHNDEREVENCO (V.). — Rôle du système nerveux central dans la régulation de la sécrétion parathyroïdienne. *Sem. Hôp. Suppl. Méd. Monde*, 1956, 32.
- BENZIE (D.), BOYNE (A.W.), DALGARNO (A.C.), DUCKWORTH (J.), HILL (R.) and WALKER (D.M.). — *J. Agric. Sci.*, 1955, 46, 425.
- *J. Agric. Sci.*, 1956, 48, 175.
- BIRD (H.R.). — Nutritive evaluation of defluorinated phosphates and other phosphorus supplements. *Jnl. Assoc. Offic. Agr. Chemist.*, 1945, 28, pp. 118-129.
- BRIGGS. — Dosage du phosphore minéral dans le sérum. *J. Biol. Ch.*, 1924, LIX, 255.
- BRAUN (W.). — Taux des différents constituants sanguins des bovins. *Am. J. Vét. Res.*, oct. 1946, 450.
- BROCHART (M.), LARVOR (P.) et VISSAC (B.). — Influence de quelques facteurs alimentaires, saisonniers et endocriniens sur le métabolisme du calcium, du phosphore et du potassium chez deux couples de femelles bovines univitellines. *Ann. Zootechnie*, 1960.
- BRONNER (F.). — Etudes sur le métabolisme du calcium au moyen d'injections intraveineuses de calcium radioactif chez l'homme. Analyse critique de *J. Clin. Invest.*, 1956, 35, 78.
- BROUARDE (P.) et MOSNY (E.). — *Traité d'hygiène*. Tome II. Libr. Baillière et fils, 1906.
- CARDASSIS. — Ostéomalacie des bovidés. *Th. Doc. Vét. Alfort*, 1938.
- CHANG (C.Y.), PHILLIPS (P.H.), HART (E.B.) and BOHSTEDT (G.). — The effect of feeding raw rock phosphate on the fluorine content of the organs and tissues of dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 1934, 17, pp. 695-700.
- CHARTON (A.), FAYE (P.), HERVY (A.) et LEFRANÇOIS (C.). — Fluctuations des taux de phosphore inorganique, calcium total et magnésium total dans le sérum de brebis durant un cycle d'élevage. *C. R. Acad. Sci. Fr.*, 1959, 248, n° 16, 2407.

- CHENC (P.S. Jr.) and NEUMAN (W.F.). — Renal excretion of calcium by the dog. *Amer. J. Physiol.*, 1955, 180, n° 3, pp. 623-631.
- CHOSSAT. — Note sur le système osseux. *C. R. Acad. Sci.*, 1842, 14.
- COLAS (F.). — Aphosphorose des sols et ses conséquences chez les herbivores. *Th. Doc. Vét., Alfort*, 1955.
- CRAIGE (A.H.), JOHNSON (R.B.), BLACKBURN (E.G.) and COFFIN (J.M.). — Renal excretion following intravenous injection of calcium salts in normal cows. *Am. J. Vet. Res.*, 1949, X, 217.
- DERIVAUX (J.). — Données actuelles sur la biochimie de l'ossification. *Ann. Med. Vet.*, mai-juin 1948, pp. 129-146.
- DETWEILER and MARTIN. — The Sulkowitch test as guide in the diagnosis and therapie of hypocalcemia. *Am. J. Vet. Res.*, 1949, X.
- DOWE (T.W.), MATSUSHIMA (J.) and ARTHAUD (V.H.). — The effect of adequate and excessive calcium when fed with adequate phosphorus in growing rations for beef calves. *J. Anim. Sci.*, 16, 811.
- DUCKWORTH (J.), GODDEN (W.) and THOMSON (W.). — The relation between rates of growth and rickets in sheeps on diets deficient in vitamin. *D. J. Agric. Sci.*, 1943, 33, pp. 190-196.
- DU TOIT (P.J.) and BISSCHOP (J.H.R.). — The breeding of cattle on phosphorus deficient weld. *15th Rep. of Dir. Vet. Serv. South-Africa*, 1929, pp. 1059-1166.
- DU TOIT (P.J.) and GREEN (H.H.). — Dicalcium phosphate as source of phosphorus in nutrition. *16th. Rep. of Dir. Vet. Serv. South-Africa*, 1930.
- DU TOIT (P.J.), MALAN (A.I.), LOUW (J.G.), HOLZAPFEL (C.R.). — A study of the mineral content and feeding value of natural pastures in the U. of S. A. First report. *18th. Rep. Dir. Vet. Serv. South-Africa*, pp. 525-577, 1932.
- Second report. *Onderstepoort Jnl. of Vet. Sci. and an Ind.*, Vol. II, n° 2, pp. 607-649, 1934.
- Third report. *Onderst. Jnl.* Vol. XIV, n° 1, and 2, 1940.
- DU TOIT (P.J.), MALAN (A.I.) and GROENEWALD (J.W.). — A comparison of phosphatic supplements for the prevention of aphosphorosis. *18th. Rep. of Dir. Vet. Serv. South-Africa*, pp. 677-702, 1932.
- The effect of two different calcium phosphorus ratios upon the growth of calves. *Onderst. Jnl. of Vet. Sc. and an. Ind.*, Vol. I, Numb. 2, 1933.
- Minimum mineral requirements of cattle. *Ondest. Jnl. of Vet. Sc. and An. Ind.*, Vol. 2, Numb. 2, pp. 565-606, 1934.
- DU TOIT (P.J.), MALAN (A.I.), GROENEWALD (J.W.) and DE KOCK (G.W.). — The effect of fluorine on preignant heifers. *18th. Rep. of Dir. Vet. Serv. and An. Ind. U. of S.A.*, 1932, pp. 806-817.

- DU TOIT (P.J.), MALAN (A.I.) and ROSSOUW (S.D.). -- Studies in mineral metabolism XII : phosphorus in the sheep industry. Preliminary report 16th rep. dir. vet. serv.
- DU TOIT (P.J.), MALAN (A.I.) and GROENEWALD (J.W.). -- Studies in mineral metabolism XVII : phosphorus in the sheep industry. 2 nd report. 17th rep. dir. vet. serv. 1931.
- Studies in mineral metabolism XVIII : phosphorus in the sheep industry. Final report 18th rep. dir. vet. serv., 1932.
- ECKLES, PALMER, GULLICKON, FITCH, BOYD, BISHOP et NELSON. -- Effects of complicated phosphorus deficiency on oestrus cycle, reproduction and composition of tissues of nature dairy cows. *The Cornell Veterinarian*, janvier 1935.
- EWER, SELLERS. -- Aphosphore des jeunes vaches. *The Vet. Record*, 1950, LXII, 343. In *Rec. Med. Vet.*, 1951, n° 1, p. 48.
- FERRANDO. -- Calcium et phosphore dans l'alimentation des animaux domestiques. Fiches techniques du Syndicat National Vétérinaire.
- FINZY. -- Contribution à la connaissance des altérations du parenchyme et des organes endocriniens au cours de l'ostéomalacie. Profilassi, mars 1939, p. 41-81 in *Rec. Med. Vet.*, 1945, CXXI, 116-117.
- FISKE (C.H.), SUBBAROW (Y.). -- The colorimetric determination of phosphorus. *J. Biol. Chim.*, 1925, LXVI, 375.
- FITCH (P.). -- Effets d'une ration faible en calcium sur la reproduction des bovidés. *The Cornell Veterinarian*, avril 1932 (in recueil 1932, 646).
- GENGOUX et PIERREUX. -- Au sujet des accidents provoqués par l'administration de gluconate de calcium. *Ann. de Méd. Vét. de Cureghem*, IV, p. 199, 1953.
- GOWDA, KEHAR et AYYAR. -- *Indian Jnl. Med. Vet.*, XLIII, pp. 603-608, 1955.
- GREAVES (J.E.), MAYNARD (E.J.) and REEDER (W.). -- Influence of calcium phosphorus intake on bovin blood. *Jnl. Agric. Res.*, 1934.
- GROENEWALD (J.W.). -- The influence of ration low in certain minerals on the composition of the blood and milk of cows, and on the blood of their progeny. *Onderst. Jnl. of Vet. Sc. and An. Ind., U. of S. A.*, Vol. IV, Numb. 1, pp. 93-165, 1935.
- GUEGEN (L.). -- Valeur comparée des phosphates minéraux comme source de phosphore pour les animaux. *Ann. Zootech.*, 1961, 10, (3), 177-196.
- GUISLANI. -- Pulpe de betteraves, facteur de cachexie osseuse. *Thèse Doct. Vét.*, Lyon, 1937.
- HUTCHINSON (E.), ALBAUM (H.G.), HODGE (H.C.), SACKS (Y.), LARDY (H.A.). -- The biology of phosphorus. I vol. *Michigan State College Press*, 1952.

JEAN-BLAIN (M.). — Cours magistral 1959-1963.

JORDAN, HART, PATTEN. — A study of the metabolism and physiological effect of certain phosphorus compounds with milch cows. *American Journal of physiology*, 16 : 268-313. N.Y. Exp. Sta. Tech. Bul. 1, pp. 3-59, 1906.

KEITH (T.B.), MELENDY (H.), JOHNSON (R.F.). — Univ. Idaho Coll. Agric. Agri. Exp. Stat. Res., bull. n° 29, 1955.

KLEIBER (M.) and COWORKERS. — Radiophosphorus P³² as tracer for measuring endogenous phosphorus in cow's feces. *Jnl Nutrition*, 45 : 253-263, 1951.

KLEIBER (M.), GOSS (H.) and GUILBERT (H.R.). — Phosphorus deficiency metabolism and food utilisation in beef heifers. *J. Nutrition* 12 : 121-153, 1936.

KHOL. — Etudes comparées de la composition chimique du sang des mammifères domestiques et de laboratoire. *Thèse Doct. Pharmacie, Paris* 1950.

KLOTZ. — Carence calcique conditionnée. Nouvelles thérapeutiques.

LAMARRE. — Sémiologie du sang des bovidés. *Rec. Méd. Vét.*, février 1933, CIX, 69-98.

LESBOUYRIES. — Syndrome d'hypocalcémie aiguë chez les animaux. *Recueil de Méd. Vét. d'Alfort*, 1932, LVIII, p. 130.

LESBOUYRIES, CHARTON. — Aphosphorose des sols et ses conséquences chez les herbivores. *Rec. Méd. Vét.*, juillet 1949, CXXV, 289-305.

LETARD (E.). — De la théorie à la pratique dans l'alimentation des animaux domestiques. *Maroc Médical*, 1954, 353, 67.

LICHWITZ (A.), DE SÈZE (S.), PARLIER (R.), HIOCO (D.), BORDIER (Ph.). — La parathyroïde, glande de protection du capital calcique. *Presse Méd.*, 1961, 69, n° 23, p. 1015.

LIÉGEOIS. — Traité de pathologie médicale des animaux domestiques, 743-801.

— Constantes sanguines des équidés, des bovins et du chien à l'état normal. *Annales de Méd. Vét.*, 1945, 89-97. In *Rec. Med. Vet.*, 1948, n° 8, CXXIV, 375-376.

LIÉGEOIS, DERIVAUX. — Ostéopathies par mutations calciques chez les animaux. *Annales Méd. Vét.*, fasc. 4, 1950, 329-336.

— Hyperphosphorose alimentaire chez le porc. *Analyse de Méd. Vét.*, juin 1951, fasc. 4.

— Calcémie, phosphatémie chez les bovidés à l'état normal. *Actualités biologiques belges*, 1943, III, 133.

— Considérations sur l'étiopathogénie des ostéopathies malaciques chez les animaux domestiques. C.R. 2^e Congrès international de biochimie de Paris, juillet 1952, 335. In *Cahiers Méd. Vét.*, 1954, VI, 189.

- LITTLEJOHN (A.I.), LEWIS (G.). — Symposium on disorders of calcium metabolism. Experimental studies of the relationship between the calcium-phosphorus ratio of the diet and fertility in heifers : a preliminary report. *Vétér. Rec.*, 72, 1137-1144.
- LUICK (J.R.), BODA (J.M.), KLEIBER (M.). — Some biokinetic aspects of calcium metabolism in dairy cows. *Amer. Jnl Physiol.*, 1957 - 189, n° 2, pp. 483-488.
- LYONNAZ (J.). — Contribution à l'étude de l'ostéomalacie chez la vache laitière. *Thèse Doct. Vét. Lyon*, 1961, n° 39.
- MALAN (A.I.). — Mineral metabolism and blood analysis. 16th. rep. dir. vet. serv., 1930, pp. 307-311.
- The phosphorus partition of blood of some animals. 16th. rep. dir. vet. serv., 1930, pp. 327-328.
- MAJUNDAR (B.N.) and RAY (S.N.). — Fluorine intoxication of cattle in India : effect of fluorosis on mineral metabolism and blood. *J. Vet. Sci.*, 1946, 16, pp. 107-721.
- MAPLESDEN (D.C.). — Practical nutrition and feeding of domestic animals. *Galt Printers Limited, Galt, Canada*, 1962.
- MAREK (J.). — Wesen, gegenseitige beziehung und therapie der rachitis, der osteomalacie und der osteoporoses. *Archiv. für Wissenschaftl U. Prakt. Tierheilkunde*, Bd. 51, pp. 1-14, 1924.
- MATHUR. — *Indian Jnl. Vet. Sci.*, XXIII, pp. 243-248, 1953.
- MAYNARD (L.A.) and LOOSLY (J.K.). — *Animal nutrition*. Mc Grav Hill book company. Nic. London, 1956.
- MITCHELL (H.H.) and EDMAN (M.). — The fluorine problem. *Nutrition Abstr. Revs.*, 1952, 21, 787.
- MOODIE, MARR, ROBERTSON. — Calcium et magnésium dans le sérum, phosphore dans le plasma chez les vaches parturientes normales. *Jnl. of Comp. Pathol. and Therap.*, LXV, pp. 20-36, 1955.
- NEELEY (K.L.) and HARBAUGH (F.G.). — Effects of fluorine ingestion. *J. Am. Vet. Med. Assoc.*, 1954, 124, p. 344.
- OTTO (J.S.). — The assimilation of calcium and phosphorus by the growing bovins. *Onderstepoort Jnl. of Vet. Sci. and An. Ind.*, Vol. X, Numb. 2, pp. 281-364, april 1938.
- Phosphorus, calcium and protein. 18th. Rep. of Dir. Vet. Serv. South-Africa, p. 703, 1932.
- PALMER (L.S.), ECKLES (C.H.) and SCHUTTE (D.J.). — Magnesium sulfate as a factor in the retention of calcium and phosphorus in cattle. *Proc. Soc. Exptl. Biol. Med.*, XXVI, pp. 58-62, 1928.
- PICARD (J.). — Action de la parathormone dans le métabolisme phosphocalcique. *Presse Méd. France*, LXIII, n° 65, p. 1320, 1955.
- PIGELLI. — *Archiv. Biochem. Biophys.*, 80, I, 8, 1959.

- POLLET (R.). — Contribution à l'étude des renversements vaginaux chez la vache. Relation avec un déséquilibre phosphocalcique. *Th. Doct. Vet. Lyon*, 1962.
- PHILLIPS (P.H.), GREENWOOD (D.A.), HOBBS (C.D.), HUFFMAN (C.F.) and SPENCER (G.R.). — The fluorosis problem in livestock production. *Natl. Research Counal Publ.*, 1960, 824.
- RAUN (A.), ANDERSON (R.), CHENG (E.), HALE (W.H.) and BURROUGHS (W.). — The validity of the artificial rumen technique in measuring phosphorus availability to cattle and sheep. *Jnl. Anim. Sci.*, XV, 1244 (abstr.), 1956.
— *Jnl. Agric. Food Chem.*, IV, p. 869, 1956.
- REIHART. — Chemical studies of the blood of normal cows. *Jnl. Am. Vet. Ass.*, CXIV, janv. 1939.
- RICHARD. — Ostéomalacie des bovidés. *Th. Doct. Vét. Alfort*, 1950.
- RIDDELL (W.H.), HUGHES (J.S.) and FITCH (J.B.). — The relation of phosphorus deficiency to the utilisation of feed in dairy cattle. *Kansas Agr. Exptl. Sta. Tech. Bull.*, XXXVI, 1934.
- ROBERTS, RICHARD and SMITH. — Test de Sulkowitch. *Jnl. Am. Vet. Med. Ass.*, CXIX, 380, nov. 1951.
- ROBIN. — Manifestations pathologiques de la carence phosphocalcique chez les animaux. *Rec. de Méd. Vét. d'Alfort*, LXXVII, p. 744, 1951.
- ROE (J.H.) and KAHN (B.S.). — *Jnl. Biol. Chem.*, vol. 67, p. 585, 1926.
— *Jnl. Biol. Chem.*, vol. 81, p. 1, 1929.
- ROSSOUW (S.D.). — The effect of bone meal feeding on the phosphorus partition of the blood of sheep. *16th. Rep. of Dir. Vet. Serv. and An. Ind. South-Africa*, 1930.
- SALANSON (A.). — Contribution à l'étude de la phosphorémie et de la calcémie chez les bovins à l'état normal et pathologique. *Th. Doct. Vét., Lyon*, 1959.
- SHERRY (B.J.) and GRIMPS (T.). — The pH values, the levels of calcium inorganic phosphorus in the blood serum of normal cattle. *Am. Jnl. Vet. Res.*, n° 57, XV, pp. 509-510, 1954.
- SHOHL (A.T.) and WOLBACH (S.B.). — Rickets in rats. *Jnl. Nut.*, vol. 2, pp. 275-291, 1936.
- SIMMOND. — *Amer. Jnl. Hyg.*, vol. 4, pp. 1-108, 1924.
- SCHMIDT (H.J.) and RAND (W.E.). — A critical study of literature on fluoride toxicologie with respect to cattle damage. *Am. J. Vet. Research.*, 1952, 13, pp. 38-49.
- SMITH (R.H.). — Calcium and magnesium metabolism in calves. Plasma levels and retention in milk-fed calves. *Biochem. Jnl. G. B.*, LXVII, n° 3, pp. 472-481, 1957.
- SOBEL (A.E.), ROCKENMACKER (M.) and KRAMER (B.). — Carbonate content of bone in relation to the composition of blood and diet. *Jnl. Biol. Chem.*, CLVIII, pp. 475-489, 1945.
— Composition of bone in relation to blood and diet. *Jnl. Biol. Chem.*, CLIX, pp. 159-171, 1945.

- SQUIBB, GUZMAN, BARHAM and SCRIMSHAW. — Several blood constituents of five breeds of dairy cattle in Guatemala. *Am. Jnl. Vet. Res.*, XIX, n° 70, pp. 112-114, 1958.
- STEENBOCK. — *Jnl. Biol. Chem.*, pp. 205-993, 1953.
- STODDARD (G.E.), HARRIS (L.E.), GREENWOOD (D.A.), BINNS (W.), SHUPE (J.L.) and BALEMAN (G.Q.). — Effects of sodium fluoride on dairy heifers. A progress Report Proc. Western Section Am. Dairy Sci. Assoc., 1954.
- SUTTIE (J.W.), MILLER (R.F.) and PHILLIPS (P.H.). — Studies of the effects of NaF on dairy cows.
- I The physiological effects and the developpemental symptoms of fluorosis. *J. Nutrition*, 1957, 63, pp. 311-224.
 - II Effects on milk production. *J. Dairy Sci.*, 1957, 40, pp. 1485-1491.
 - III Skeletal and soft tissue fluorine deposition and fluorine toxicosis. *J. Nutr.*, 1958, 65, p. 293.
- SUTTIE (J.W.) and PHILLIPS (P.H.). — IV Mental changes as the result of long-term fluorine ingestion. *J. Nutr.*, 1960, 71, pp. 109-114.
- V A three-year study on mature animals. *J. Dairy Sci.*, 1959, 42, pp. 1063-1069.
- SUTTIE (J.W.), GESTELAND (R.) and PHILLIPS (P.H.). — VI In young heifers. *J. Dairy Sci.*, 1961, 44, pp. 2250-2258.
- TALMAGE (R.V.). — Studies on the maintenance of serum calcium levels by parathyroid action on bone and kidney. *Am. N. Y. Acad. Sci.*, LXIV, 3, pp. 327-355, 1956.
- THEILER (A.). — Facts and theories about styfziekte and lamziekte. 2nd. Rep. of Dir. Vet. Serv. and An. Ind. Union of South Africa, 1913.
- The cause and prevention of lamziekte. *Jnl. Dept. Agric., U. of S.A.*, vol. 1, n° 3, pp. 221-244, 1920.
 - Lamziekte (parabotulism) in cattle in South Africa. 11th. and 12th. Rep. of Dir. Vet. Serv., U. of S.A., part 2, 1927.
 - La déficience en phosphore et la stérilité chez la vache. *Ann. Med. Vet.*, 437, 1933.
- THEILER (A.) and GREEN (H.H.). — Les dystrophies osseuses des animaux domestiques. *Bull. O.I.E.*, VIII, pp. 19-114, 1934.
- THEILER (A.), GREEN (H.H.) and DU TOIT (P.J.). — Minimum mineral requirements in cattle. *Jnl. Agric. Sci.*, vol. 17, pp. 291-314, 1927.
- Breeding of cattle on phosphorus deficient pastures. *Jnl. Agric. Sci.*, vol. 18, pp. 369-371, 1928.
- THEILER (A.), GREEN (H.H.) and VILJOEN (P.R.). — Contribution to the study of deficiency diseases, with special reference to the lamziekte problem in South Africa. 3rd. and 4th. Rep. of *Dir. Vet. Serv. S.A.*, 1915.
- TUEILER (A.) and ORR (J.B.). — The health and nutrition of animals. H. J. Green, government printer, Melbourne, 1929.

- THEILER (A.) and GREEN (H.H.). — Aphosphorosis in ruminants. *Nut. Abs. Ans. Rev.*, pp. 359-385, 1932.
- TILLMAN (A.D.) and BRETHOUR (J.R.). — Ruminant utilization of sodium meta-, ortho- and pyrophosphates. *Jnl. Anim. Sci.*, XVII, pp. 100-104 et 792-796, 1958.
- VAN ZYL (J.P.). — Soil conditions in typical lamziekte and styfziekte soils, as revealed by pot-cultures. 13th. and 14th. Rep. of. *Dir. Vet. Serv. of U. of S.A.*, part 2, pp. 993-1041, 1928.
- VAUDEY. — Rapports ostéomalacie, hémoglobinurie et stérilité de la vache laitière. *Th. Doct. Vét. Alfort*, 1946.
- VAULANDINGHAN, ANDERSON and BOULING. — Studies of the chemical composition of the blood of dairy cattle. *Jnl. Dairy Sci.*, XXV, p. 548, 1942.
- VERSTRAETE (A.) und CLOETENS (R.). — Koninklijke Vlaamache Academie vor Geneeskunde vom Belgie, IV, 6, pp. 167-216, 1942.
- Considérations cliniques et chimiques sur le rachitisme animal. In *Ann. Med. Vet.*, mars 1943.
- WASSERMAN (R.M.). — Calcium and phosphorus interractions in nutrition and physiology. *Feder. Proc.*, XIX, p. 636.
- WEATHERELL (J.A.) and WEIDMAN (S.M.). — The skeletal changes of chronic experimental fluorosis. *J. Pathol. Bacteriol.*, 1959, 78, p. 233.
- WELLMANN. — Rapport des substances minérales dans l'alimentation des animaux et satisfaction des besoins de l'organisme en chaux et phosphore. *Bull. Soc. Vet. Prat.*, fév. 1941, 30.
- ZUNDEL. — Dosage du calcium et du phosphore dans le sang. *Rec. Med. Vet. Alfort*, déc. 1957.
- La carence phosphorique, ses répercussions en biologie. Complément aux conclusions générales présentées aux Journées du phosphore. Janv. 1949, P.U.F.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	9
--------------------	---

PREMIÈRE PARTIE

CONNAISSANCES ACTUELLES	11
-------------------------------	----

CHAPITRE PREMIER. — *Phosphore et calcium dans la nature :*

<i>le problème alimentaire</i>	13
--------------------------------------	----

I. — Quantités de phosphore et de calcium dans la nature	13
--	----

1) dans le monde minéral	13
--------------------------------	----

2) dans le monde végétal	14
--------------------------------	----

3) dans le monde animal	15
-------------------------------	----

dans les os	15
-------------------	----

dans les tissus mous	15
----------------------------	----

dans le sang	15
--------------------	----

II. — Qualités du phosphore et du calcium	19
---	----

1) assimilabilité	19
-------------------------	----

2) variations de l'assimilation et de l'utilisation du phosphore et du calcium alimentaires	21
--	----

A. Besoins et alimentation	21
----------------------------------	----

B. Rapport phosphocalcique	21
----------------------------------	----

a) expériences de Theiler et Green	22
--	----

b) expériences de Becker, Neal et Shealy	27
--	----

C. Vitamine D	27
---------------------	----

III. — Conclusion	27
-------------------------	----

CHAPITRE II. — <i>Phosphore et calcium chez les animaux sains :</i>	
<i>le problème physiologique</i>	29
I. — Grandes lignes du métabolisme	29
II. — Absorption	29
III. — Dans le sang	30
IV. — Dans les os	31
V. — L'excrétion	31
CHAPITRE III. — <i>Phosphore et calcium chez les animaux malades : le problème pathologique</i>	33

DEUXIÈME PARTIE

PHOSPHATEMIE ET NATURE DE L'APPORT PHOSPHATE 35

CHAPITRE PREMIER. — <i>Méthodes d'appréciation des sels minéraux</i>	39
I. — Méthodes in vitro	39
II. — Méthodes employées chez l'animal vivant	39
— Test de l'ostéophagie	39
— Vitesse de croissance	40
— Etude des os après abattage	40
— Etude des os par radiographie	40
— Etablissement de bilans digestifs	41
— Dosages de phosphatémie	41
CHAPITRE II. — <i>Valeur des dosages de phosphatémie comme tests d'évaluation des minéraux phosphatés</i>	43
I. — Facteurs de variation de la phosphatémie	43
— L'âge	43
— L'état de gestation ou de lactation	43
— La saison	44
— Le travail musculaire	44
— L'alimentation	44
— Les facteurs physiologiques	46

II. — La phosphatémie, test d'efficacité des minéraux phosphatés	46
III. — Conclusion	48

TROISIÈME PARTIE

TRAVAIL PERSONNEL	51
CHAPITRE PREMIER. — <i>Expérimentation</i>	55
I. — Le milieu	55
II. — Le bétail	57
III. — L'alimentation	57
— Alimentation de base	57
— Sels minéraux	60
IV. — Technique des dosages	61
V. — Chronologie des essais	63
CHAPITRE II. — <i>Résultats numériques</i>	67
I. — Calcémie	67
— Calcémie moyenne	67
— Calcémie en fonction de l'apport alimentaire	67
II. — Phosphatémie	68
1. Phosphatémie de base	68
2. Variations de la phosphatémie suivant l'âge ..	71
3. Variations de la phosphatémie suivant l'alimentation	71
a) suivant l'apport phosphaté	71
b) suivant le taux de fluor	76
III. — Conclusion	76
CHAPITRE III. — <i>Résultats graphiques</i>	79
CONCLUSIONS	89
BIBLIOGRAPHIE	91

